

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikované mechaniky

Počítačová simulace funkce chladiče předního světlometu
automobilu

Computer Simulation Functions Radiator Car Headlight

Student: Bc. Vojtěch Bojko

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Bojko**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Počítačová simulace funkce chladiče předního světlometu automobilu**
Computer Simulation Functions Radiator Car Headlight

Zásady pro vypracování:

- 1) Rešerše literatury o teorii chlazení předního automobilového světlometu vybaveného LED technologií.
- 2) Vytvoření počítačového modelu v programu ANSYS-Workbench z dodané výkresové dokumentace firmy Varroc.
- 3) Stacionární tepelný výpočet.
- 4) Optimalizační studie tvaru pasivního chladiče.
- 5) Obecná doporučení pro konstrukci pasivního chladiče.
- 6) Vyhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1] Firemní podklady Varroc Lighting Systems
- 2] ANSYS Mechanical User's Guide, © 2013 SAS IP, Inc., Release 15.0, pp. 1858
- 3] Tutorials for ANSYS Workbench <http://www.ansys.com/tutorials>
- 4] Workbench User's Guide, © 2013 SAS IP, Inc., Release 15.0, pp. 294

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

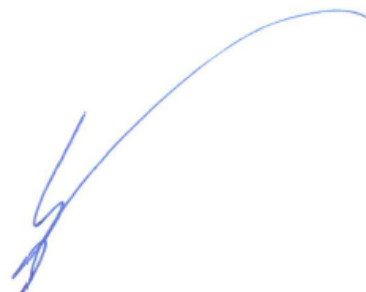
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě 8.května

.....
Vojtěch Bělý
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci využít (§ 35 odst.3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému Edison.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 8. května 2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Vojtěch Bojko

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Písek u Jablunkova 450, 73984

Poděkování

Je mou milou povinností poděkovat všem, kteří mě podporovali jak v průběhu tvorby této diplomové práce, tak i v průběhu celého studia. Děkuji celému týmu CAE inženýrů společnosti Varroc Lighting systems, zejména pak Mgr. Jaroslavu Hášovi za podnětné připomínky a pomoc při naladění teplotních výpočtů a měření. Dále velmi děkuji prof. Ing. Petrovi Horylovi, CSc., dr.h.c. a Ing. Tomášovi Blejchařovi, Ph. D. Bez jejich rad a zkušeností by tato práce nemohla vzniknout. Velmi také děkuji mým rodičům za podporu a povzbuzování po celou dobu mého studia.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bojko, V. *Návrh a optimalizace chladiče předního světlometu*: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2015, 60s. Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.

Cílem této diplomové práce je optimalizovat tvar chladiče, který je používán ve vozech skupiny Jaguar Land Rover pro pasivní chlazení LED diody Philips H1K. Při optimalizaci chladiče je kladen důraz na maximální úsporu materiálu a jednoduchost výroby chladiče. Současně je sledována maximální teplota pod čipem LED diody, která nesmí překročit maximální dovolenou teplotu udanou výrobcem. Dále bude analyzována závislost maximální teploty pod čipem LED diody vzhledem k natočení chladiče v gravitačním poli Země. Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou popsány způsoby šíření tepla a metodika návrhu pasivního chladiče. V praktické části je pak zpracována analýza maximální teploty na čipu LED diody při natočení chladiče v gravitačním poli a je optimalizován tvar chladiče pro pasivní chlazení.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Bojko, V. *Design and optimization of headlight radiator*: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2015, 60p, Thesis Head: prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.

The aim of this Diploma thesis is optimization of heatsink, which is widely used for LED diode passive cooling in Jaguar Land Rover cars. Material savings and simplicity of heatsink manufacturing will be the key parameters in the optimization process. Moreover, maximal temperature under the LED chip will be monitored, because it must not exceed maximal allowed temperature of the chip. Hereafter, the dependency between maximal chip temperature and heatsink orientation in gravity field will be analyzed. The thesis is divided into practical and theoretical part. Thermal energy transfer and heatsink design methodology are depicted in the theoretical part. Above mentioned dependency and heatsink design optimization is processed in practical part of the thesis.

Obsah

Seznam použitých zkratek a jednotek	8
1 Úvod	10
2 Varroc Lighting systems	12
3 Chlazení LED technologií	14
3.1 Způsoby šíření tepla	16
3.2 Obecné předpoklady při návrhu chladiče	19
3.2.1 Základní rozbor teplotního výkonu chladiče	19
3.2.2 Klíčové parametry a vlastnosti ovlivňující výkon chladiče	20
3.2.3 Možnosti snížení tepelného odporu	21
3.3 Postup při návrhu pasivního chladiče	23
4 Optimalizace tvaru chladiče při pasivním chlazení	25
4.1 Měření příkonu LED diody Philips H1K a teploty pod čipem	26
4.2 Teplotní analýza ustáleného stavu původního designu	30
4.2.1 Geometrie počítačového modelu a materiálové parametry	30
4.2.3 Síť konečných prvků	32
4.2.4 Okrajové podmínky a další nastavení teplotní analýzy	38
4.2.5 Rozložení teploty na chladiči při analýze ustáleného stavu	40
4.3 Analýza maximální teploty na čipu při natočení chladiče v gravitačním poli	43
4.4 Optimalizovaný tvar pasivního chladiče	48
5 Závěr	56
Seznam použité literatury a převzatých obrázků	58

Seznam použitých zkratk a jednotek

CFD	Computational Fluid Dynamics	
c_p	Měrná tepelná kapacita	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
D	Charakteristický rozměr oblasti	$[\text{m}]$
f_h	Výška žebra	$[\text{mm}]$
f_l	Délka žebra	$[\text{mm}]$
f_t	Tloušťka žebra	$[\text{mm}]$
g	Tíhové zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
Gr	Grashofovo číslo	$[-]$
h	Statická entalpie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
H_{ca}	Teplo přenesené 1 °C z plochy A	$[\text{W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
H_{tr}	Součinitel přestupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
I	Proud	$[\text{A}]$
LED	Light Emmiting Diode	
Δp	Pokles tlaku	$[\text{Pa}]$
P	Příkon	$[\text{W}]$
P_{dis}	Disipativní výkon	$[\text{W}]$
q	Hustota tepelného toku	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
R_{ca}	Tepelný odpor mezi plochou a okolím	$[\text{°C} \cdot \text{W}^{-1}]$
R_{cs}	Tepelný odpor mezi zdrojem tepla a chladičem	$[\text{°C} \cdot \text{W}^{-1}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
S_{opt}	Optimální mezera mezi žebry	$[\text{mm}]$
ΔT	Teplotní gradient	$[\text{°C}]$
T_a	Ambientní teplota	$[\text{°C}]$
T_{max}	Maximální dovolená teplota PN přechodu	$[\text{°C}]$
$T_{surface}$	Teplota povrchu	$[\text{°C}]$
U	Napětí	$[\text{V}]$
\dot{V}	Objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
β	Součinitel teplotní roztažnosti tekutiny	$[\text{K}^{-1}]$
η	Účinnost	$[\%]$

μ	Dynamická viskozita	[Pa·s]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]

1 Úvod

Vývoj, moderní technologie, šetrnost k životnímu prostředí a elegance technického provedení – to vše jsou společné jmenovatele odlišující výjimečné výrobky od těch průměrných ve všech odvětvích současné produkce. V automobilovém průmyslu to platí dvojnásob. Proto jsou výrobci vnějšího osvětlení automobilů nuceni postupně přecházet od klasický halogenových či xenonových žárovek na LED diody.

V roce 2004 se stala Audi A8 W12 prvním sériově vyráběným automobilem, který měl v předním světlometu integrovány LED diody pro denní svícení. Používání LED diod v automobilovém průmyslu zaznamenaly od toho roku obrovský rozkvět. Postupně se snažili zabudovat LED technologie do svých světlometů i další výrobci (rok 2007 – Lexus LS 600h). Audi si však udržela i další světový primát. V roce 2007 představila ve svém sportovním Audi R8 V10 první plně „ledkový“ přední světlomet.

V dnešní době patří technologie LED osvětlení k nejvyspělejším a nejúspornějším zdrojům umělého světla a je pro své kladné vlastnosti široce využíváno nejen v automobilovém průmyslu. LED osvětlení vyniká kupříkladu extrémní odolností proti vibracím a má při správně dimenzovaném chlazení velmi vysokou životnost. Při zvýšené teplotě čipu LED diody se výrazně zkracuje její životnost a svítivost. Pro správné fungování LED diody je proto zapotřebí zajistit správný odvod ztrátového tepla od čipu LED diody. V technické praxi se ztrátové teplo LED diody nejčastěji odvádí pomocí chladičů z hliníkových slitin.

Cílem této diplomové práce je optimalizovat tvar chladiče, který je používán ve vozech skupiny Jaguar Land Rover pro pasivní chlazení LED diody Philips H1K. Původní tvar chladiče poskytla firma Varroc Lighting systems. Při úpravách tvaru chladiče bude zapotřebí brát v úvahu klíčové požadavky společnosti Varroc Lighting Systems. Prvním a zásadním požadavkem je maximální úspora materiálu chladiče. Dalším požadavkem je zachování jednoduchého tvaru chladiče a s tím související nízké výrobní náklady. Posledním požadavkem bylo zachování upevňovacích rozměrů chladiče a maximální teploty LED diody.

Pro správné „naladění“ teplotních výpočtů bude nejprve provedeno měření okamžitého příkonu LED diody a maximální teploty pod čipem a to v různých ambientních teplotách. Následně budou porovnány naměřené hodnoty s výsledky teplotních výpočtů ze softwarů Ansys CFX a NX9.0 Siemens.

V dalším kroku budou navrženy úpravy průřezu chladiče, a pomocí parametrického kótování a parametrické optimalizace bude nalezen optimální tvar chladiče. Optimalizační

schéma bude vytvořeno v prostředí Ansys Workbench a výpočet bude probíhat v softwaru Ansys CFX.

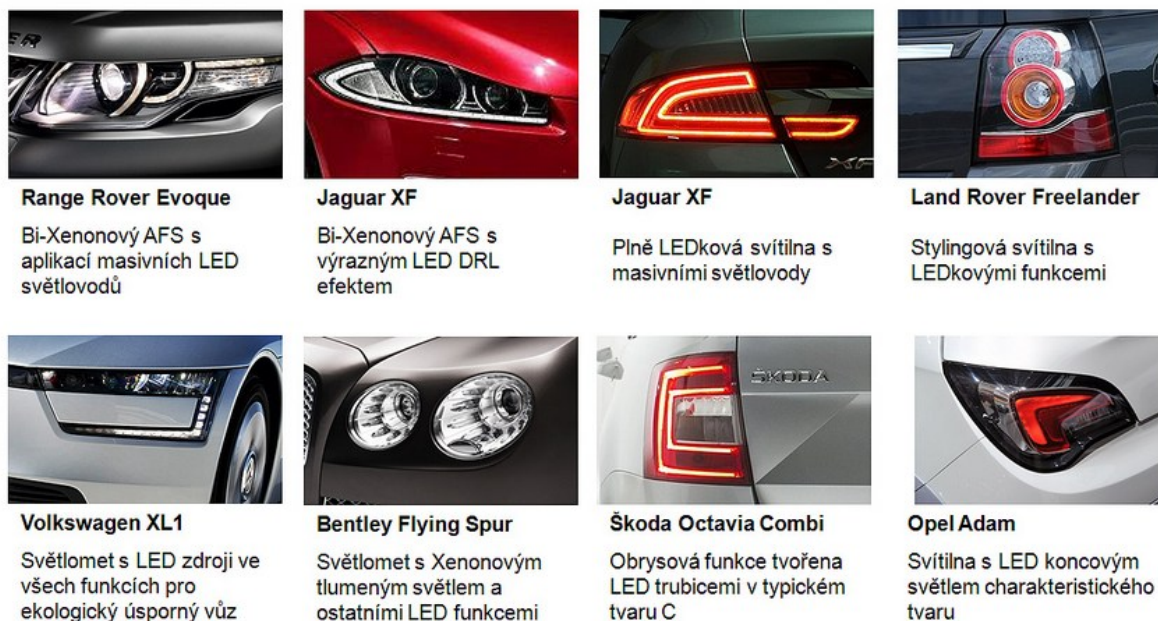
Podstatná část diplomové práce bude věnována také analýze vlivu orientace chladiče na maximální teplotu čipu LED diody. Bude vypočteno 7 simulací ustáleného stavu při různých hodnotách natočení chladiče vzhledem ke gravitaci. První analýza bude při vertikální orientaci chladiče a postupně budeme chladič po 15° natáčet.

Na závěr práce bude zhodnocen optimální tvar a navržena optimální orientace chladiče.

2 Varroc Lighting systems

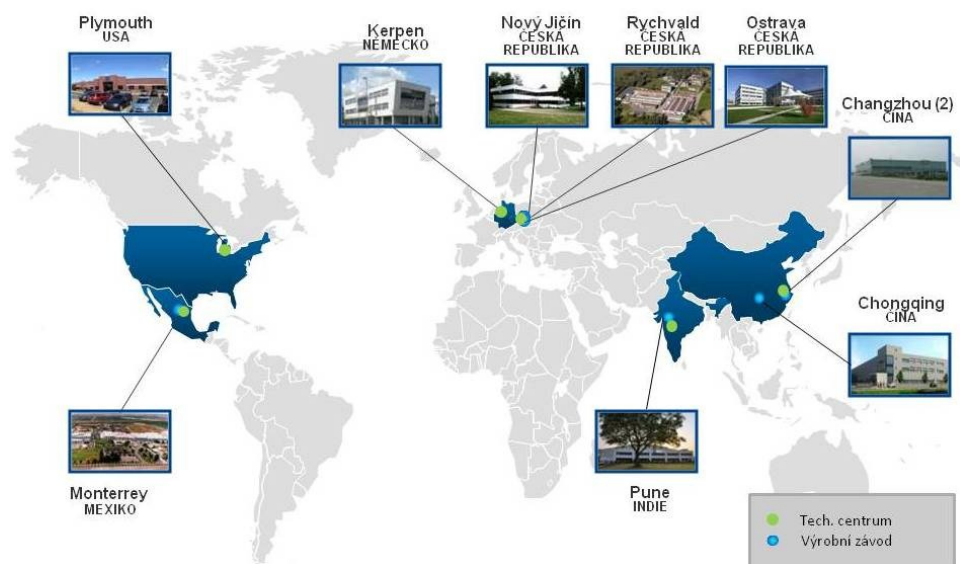
Na úvod je potřeba představit společnost Varroc Lighting systems, která je zadavatelem této diplomové práce a poskytla vzorky a veškeré potřebné vybavení pro měření a teplotní analýzy.

Mezi stěžejní produkty společnosti Varroc Lighting systems patří přední světlomety, zadní skupinová svítidla a řídicí jednotky. Část portfolia společnosti je vidět na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Část portfolia Varroc Lighting Systems [1]

Historie společnosti v České republice sahá až do 19. století, kdy se v továrně Joro v Novém Jičíně začaly vyrábět světelné systémy pro automobilový průmysl. Později se společnost dostala do povědomí široké veřejnosti pod názvem národní podnik Autopal. V devadesátých letech 20. století získal společnost významný vlastník globálního významu – Ford Motor Co. ACD. Na přelomu tisíciletí zažila společnost obrovský rozmach díky nemalým investicím do vývoje a postupně se stala předním hráčem na trhu s vnějším osvětlením automobilů. Dnes společnost Varroc Lighting systems reprezentuje centrum excelence celosvětově působící skupiny Varroc Group. Lokality výrobních kapacit a vývojových center společnosti jsou uvedeny na obrázku 2.2. Víze společnosti je zůstat jedním z předních světových výrobců automobilového osvětlení a vyvíjet technologie, které zákazníkům přinášejí vysokou přidanou hodnotu.



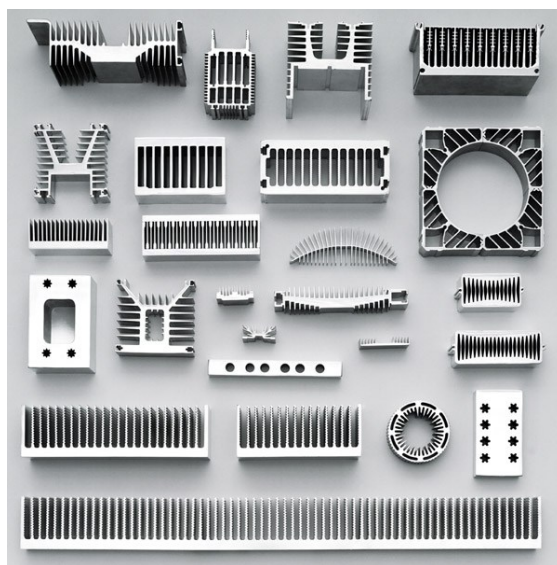
Obrázek 2.2: Lokality globálního působení Varroc Group [2]

3 Chlazení LED technologií

LED (z anglického sousloví Light Emitting Diode) je zkratka pro elektrickou polovodičovou součástku se schopností vyzařovat světlo. V dnešní době patří technologie LED osvětlení k nejvyspělejším a nejúspěšnějším zdrojům umělého světla a je hojně využíváno nejen v automobilovém průmyslu.

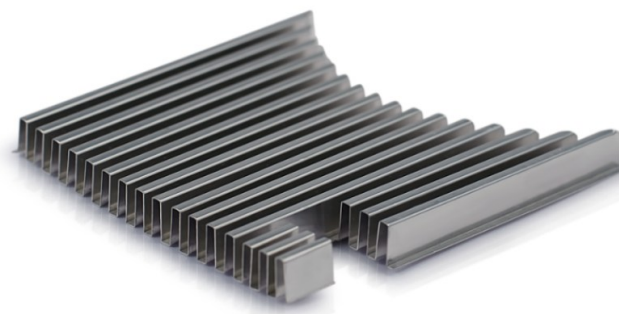
Jak již bylo zmíněno v úvodu, LED osvětlení má při správně dimenzovaném chlazení velmi vysokou životnost. Účinnost LED diod se pohybuje kolem 15 %. To znamená, že 15 % příkonu se přemění na světlo a zbytek přiváděné elektrické energie se pak mění ve ztrátové teplo. Toto nadbytečné teplo je potřeba od čipu LED diody odvádět, protože životnost diody přímo závisí na teplotě, které je dioda vystavena. Pojem životnost LED diody a životnost klasických žárovek není totéž. Životnost klasické žárovky nebo žárovky je doba, po které světelný zdroj přestane svítit (praskne trubice, přeruší se vlákno). U LED diod je životnost definována jako doba, po které se svítivost diody sníží na 70 % své původní svítivosti. Dioda tedy nepřestane svítit, jenom svítí méně. Většina výrobců udává životnost LED diod 20 000 až 50 000 hodin, ovšem při teplotě 25 °C. Takových teplot však prakticky není možné dosáhnout.

Pro snížení maximální teploty se u většiny LED diod používá chladič přilepený k čipu diody (viz Obrázek 3.1). Chladič snižuje teplotu čipu zvýšením plochy, která je v kontaktu s chladicí tekutinou. Hliníkové chladiče vyrobené metodou protlačování jsou efektivní při nízkých výrobních nákladech. Nejčastěji využívanou hliníkovou slitinou pro výrobu chladičů touto metodou je slitina 6063-T5.



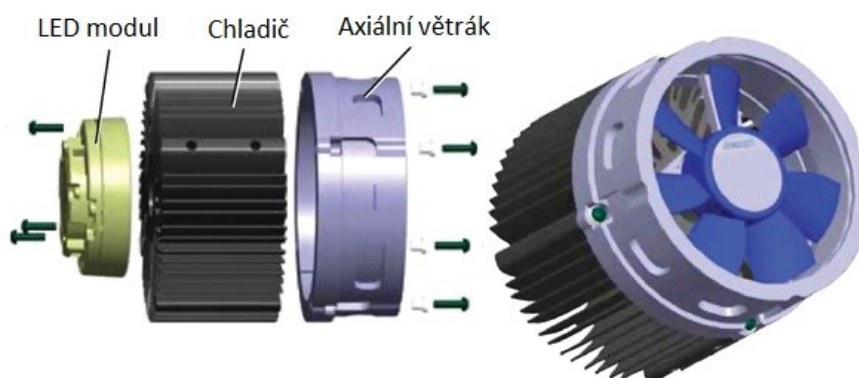
Obrázek 3.1: Chladiče vyrobené metodou Extrusion [3]

Mezi další možné technologické postupy výroby hliníkových chladičů jsou lisování, odlévání, skládání (viz Obrázek 3.2).



Obrázek 3.2: Chladič vyrobený skládáním [4]

Nejčastěji využívané typy chlazení LED diod je z hlediska konvekce možné rozdělit do dvou hlavních kategorií - pasivní a aktivní chlazení. Při aktivním chlazení (viz Obrázek 3.3) je tekutina uváděna do pohybu pomocí větráku. Tekutina pak obtéká žebra chladiče a odvádí přebytečné teplo. Princip výměny tepelné energie v případě aktivního chlazení je nucená konvekce. Mezi hlavní výhody aktivního chlazení patří vysoká účinnost, nevýhodou je ovšem vysoká cena, vyšší spotřeba energie a složitost konstrukčního řešení.



Obrázek 3.3: Nejčastější konstrukční řešení při aktivním chlazení LED diod [5]

Pasivní chlazení je jednodušší, ovšem mnohem méně účinné. Při pasivním chlazení (viz Obrázek 3.4) je proudění kolem žebí chladiče způsobeno pouze vztakovými silami – princip volné konvekce (podrobněji je princip volné konvekce popsán v podkapitole 3.1).



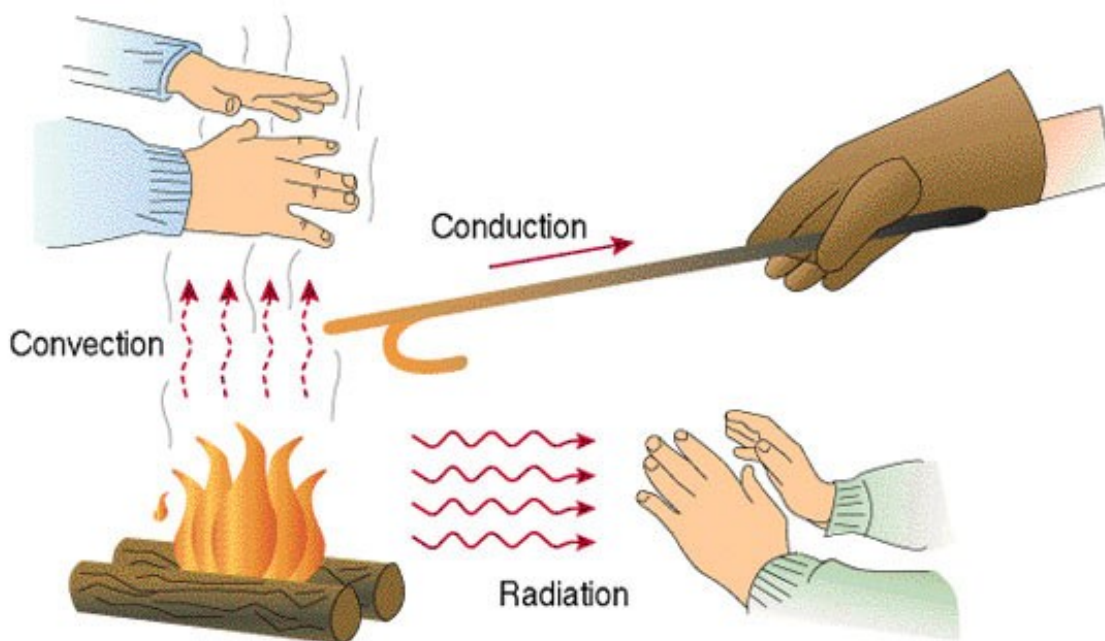
Obrázek 3.4: Pasivní chlazení LED diody [6]

3.1 Způsoby šíření tepla

Fyzikální principy šíření tepelné energie se nemění v závislosti na typu zdroje této energie, a proto je možné i pro chlazení LED technologií aplikovat základní způsoby šíření tepla.

Tepelná energie se může šířit třemi základními způsoby (viz Obrázek 3.5):

- Kondukcí (vedením)
- Konvekcí (prouděním)
- Radiací (sáláním)



Obrázek 3.5: Základní principy šíření tepelné energie [7]

Kondukce – vedení tepla

Kondukce je přenos vnitřní energie v důsledku mikroskopické difuze a kolizí částic uvnitř pevného tělesa. Kolidující částice jsou molekuly, atomy a elektrony. Všechny tyto částice přenášejí neuspořádanou kinetickou a potenciální energii, které se obecně říká vnitřní energie. Vedení tepla může vznikat pouze uvnitř tělesa nebo mezi dvěma tělesy, které jsou v přímém kontaktu.

Základní rovnicí popisující vedení tepla kondukcí je Fourierův zákon. Fourierův zákon definuje vztah mezi hustotou tepelného toku a teplotním gradientem (viz Rovnice 3.1).

$$q = \lambda \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

kde: q – hustota tepelného toku [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

λ – tepelná vodivost tekutiny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

ΔT – teplotní gradient [$^{\circ}\text{C}$].

Konvekce – proudění tekutiny

Šíření tepla prouděním je možné pouze u tekutin (kapalin nebo plynů), není možné v pevných látkách. Stejně jako u kondukce se v reálných podmínkách nikdy nejedná o čistou konvekci, protože uvnitř proudící tekutiny a na rozhraní pevné stěny a tekutiny nastávají oba způsoby přenosu tepla.

Při ohřátí tekutiny se mění její hustota a rozdílem hustot dochází v tíhovém poli ke vzniku vztlačových sil a následně k proudění, které je označováno jako přirozená (volná) konvekce. Pokud je konvekce způsobená nuceným prouděním tekutiny i vztlačovými silami, je tato konvekce označována jako smíšená. Význam vztlačových sil při smíšené konvekci je možné určit podle poměru Grashofova čísla a druhé mocniny Reynoldsova čísla (viz Rovnice 3.2).

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot h}{\rho \cdot \mu^2} \quad (3.2)$$

kde: $\Delta \rho$ – gradient hustoty [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

g – tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

h – statická entalpie [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

ρ – hustota tekutiny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

μ – dynamická viskozita tekutiny [$\text{Pa} \cdot \text{s}$].

Pokud je:

$$\frac{Gr}{R_e^2} \gg 1 - \text{vztlakové síly významně ovlivňují proudění}$$

$$\frac{Gr}{R_e^2} \ll 1 - \text{vztlakové síly je možné zanedbat}$$

V případě volné konvekce je nutné posoudit, zda v oblasti dojde k laminárnímu nebo turbulentnímu proudění a podle toho nastavit turbulentní výpočtový model. Typ proudění v případě volné konvekce se posuzuje podle hodnoty Rayleighova čísla. Praktický výpočet Rayleighova čísla je v této práci proveden v podkapitole 4.2.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3 \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\mu \cdot \lambda} \quad (3.3)$$

kde: g – tíhové zrychlení

β – koeficient teplotní roztažnosti

ΔT – teplotní gradient

D – charakteristický rozměr oblasti

ρ – průměrná hustota proudící tekutiny.

Radiace - sálání

Při sálání dochází k uvolňování energie do prostoru ve formě elektromagnetického záření. Oproti přenosu tepla vedením či prouděním se může tepelná energie prostřednictvím sálání přenášet bez hmotného prostředí. Velikost vyzařované energie je závislá na několika faktorech, jsou to tedy:

- teplota tělesa – množství vyzařené energie je popsáno Planckovým zákonem
- velikost plochy – množství vyzařené energie je přímo úměrné velikosti povrchu vyzařujícího tělesa
- barva povrchu – bílé a metalické povrchy vyzařují nejmenší množství energie, naopak černé povrchy vyzařují největší množství energie. Při teplotách přibližně nad 1000 °C se však vliv barvy povrchu zanedbává a s malou chybou je možné počítat s tím, že se povrch chová jako povrch absolutně černého tělesa. Veličina popisující schopnost tělesa vyzařovat tepelnou energii se nazývá emisivita.

Emisivita daného povrchu je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného povrchu při dané teplotě k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou.

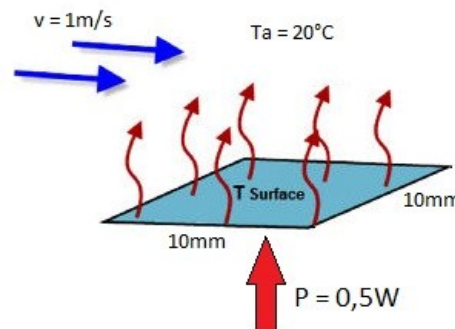
3.2 Obecné předpoklady při návrhu chladiče

Cíle této podkapitoly jsou následující:

- Provést základní rozbor teplotního výkonu chladiče
- Definovat klíčové parametry a vlastnosti, které je nutné vzít v úvahu při návrhu chladiče
- Popsat možnosti snížení tepelného odporu mezi ohřívanou plochou a okolním prostředím.

3.2.1 Základní rozbor teplotního výkonu chladiče

Představme si čtvercovou plochu, jak je vyobrazená na obrázku vpravo, která rovnoměrně uvolňuje 0,5 W energie. Jaká bude teplota ohřívané plochy v daném prostředí a při dané geometrii (viz Obrázek 3.6), pokud se má energie rovnoměrně uvolňovat do okolního prostředí, které tvoří vzduch o teplotě 20 °C a rychlosti 1 m/s?



Obrázek 3.6: Schéma nucené konvekce

Teplotu plochy je možné určit následovně:

$$T_{surface} = T_a + \Delta T \quad (3.4)$$

$$\Delta T = P \cdot R_{ca} \quad (3.5)$$

kde: T_a – ambientní teplota [°C]

ΔT – nárůst teploty [°C]

R_{ca} – tepelný odpor mezi plochou a okolím [°C/W]

P – uvolněná energie (výkon) [W].

$$R_{ca} = \frac{1}{H_{ca}} \quad (3.6)$$

kde: H_{ca} – teplo přenesené 1°C z plochy A [W·°C⁻¹].

$$H_{ca} = H_{tr} \cdot A \quad (3.7)$$

$$H_{ca} = 40 \cdot 0,01 \cdot 0,01 = 0,004 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

kde: H_{tr} – součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$] – podrobněji viz podkapitola 3.2.2.

Pak můžeme podle rovnice 3.3 vypočíst tepelný odpor mezi plochou a okolím takto:

$$R_{ca} = \frac{1}{0,004} = 250 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad (3.8)$$

Máme-li určený tepelný odpor, je možné určit teplotu ohřívané plochy podle rovnic 3.1 a 3.2 a to takto:

$$T_{surface} = 20 + 0,5 \cdot 250 = 145^\circ\text{C} \quad (3.9)$$

Vypočetli jsme, že pro uchlazení 0,5 W z jednoho čtverečního centimetru vzroste teplota povrchu až na 145 °C, za předpokladu že žádné teplo neodchází do okolí radiací (jedná se o povrch s nízkou emisivitou).

3.2.2 Klíčové parametry a vlastnosti ovlivňující výkon chladiče

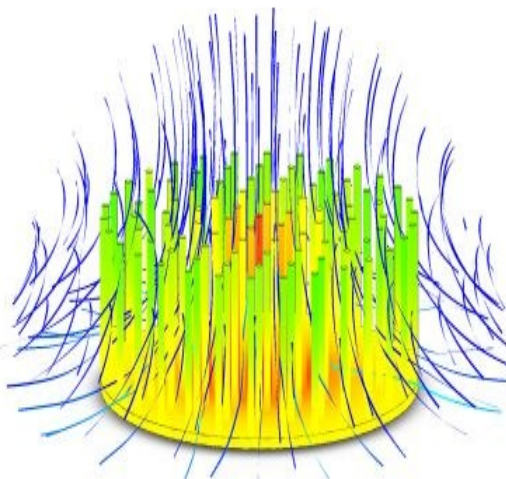
V předchozí podkapitole bylo dokázáno, že pro disipaci 0,5 W energie se teplota dané plochy při dané teplotě a podmínkách výrazně zvýší. Ve změně teploty hrály hlavní roli dva parametry. Je potřeba je detailněji popsat a zjistit, jak je možné s nimi pracovat při snižování teploty ohřívajícího povrchu.

- **Emisivita materiálu** – obecně zvýšení emisivity přímo neznamená velký teplotní pokles ohřívající plochy (tomuto parametru bude ještě později věnována větší pozornost)
- **Součinitel přestupu tepla** - H_{tr} – vlastnost materiálu, která závisí na geometrii ohřívající plochy a oblasti vyplněné tekutinou, dále pak na vlastnostech tekutiny a na rychlostním profilu přes ohřívající plochu. Součinitel přestupu tepla je možné určit pomocí množství různých korelací, kupříkladu podle Churchilla a Chua pro přirozenou konvekci nebo podle W. H. McAdamse pro nucenou konvekci. Tyto korelace jsou navrženy tak, aby postihly veškeré výše uvedené proměnné daného prostředí

- **Konvekce**

Přirozená, volná konvekce (pasivní chlazení)

Jediné proudění okolo ohřívané plochy vzniká v důsledku vztlačových sil. Vztlačové síly (viz Obrázek 3.7) je možné chápat jako výsledek tepelné roztažnosti tekutin. Lehčí ohřátý vzduch je tlačén v gravitačním poli vzhůru a způsobuje proudění vzduchu okolo zahřáté plochy. Tohoto efektu bude v této práci využito při designu žeber a orientace chladiče pro pasivní chlazení v této práci.



Obrázek 3.7: Vztlačové síly [8]

Nucená konvekce (aktivní chlazení)

Při nucené konvekci je tekutina uváděna do pohybu větrákem, nebo rozdílem tlaků. V této práci bude optimalizován tvar chladiče pro pasivní chlazení, nicméně pro lepší pochopení principu chlazení LED diod nebude na škodu stručně vysvětlit i mechanismus aktivního chlazení.

- **Kondukce**

Na tepelný odpor chladiče má velký vliv i další vlastnost materiálu chladiče, která se nazývá kondukce. Tato vlastnost snižuje efektivitu zvětšování chladicí plochy. Tepelný odpor R_{sa} se tedy skládá z obou odporů – kondukce a konvekce.

3.2.3 Možnosti snížení tepelného odporu

Případ v podkapitole 3.2.1 je samozřejmě nucená konvekce, protože je přímo zadána rychlost vzduchu proudícího kolem ohřívané plochy. Z korelací je možné dopočítat, že součinitel přestupu tepla v tomto případě je $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Je-li zapotřebí snížit tepelný odpor

ohřívání plochy (viz Rovnice 3.3), je nutné zvýšit součinitel přestupu tepla nebo zvětšit velikost ohřívání plochy (viz Rovnice 3.4).

Zvýšení součinitele přestupu tepla

Jednou z možností jak zvýšit součinitel přestupu tepla je zvýšit rychlost proudění přes žebra chladiče. Jak se ale změní teplota ohřívání povrchu, když se bude zvyšovat rychlost proudícího vzduchu?

Při rychlosti proudění vzduchu 2m/s vypočteme z korelace součinitel přestupu tepla $55 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ a pro rychlost 3m/s bude součinitel přestupu tepla $68 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$. Po dosazení do rovnic 3.1 až 3.6 povedou tato zvýšení rychlosti proudícího vzduchu ke snížení tepelného odporu na $182 \text{ }^\circ\text{C/W}$ respektive $147 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Teplota ohřívání plochy bude rovna $74 \text{ }^\circ\text{C}$ i při zvýšení rychlosti proudění vzduchu na 3 m/s . Pomineme-li neefektivnost tohoto řešení jako takovou, jaké budou náklady takového řešení? Je možné dokázat, že:

$$P = \Delta p \cdot \dot{V} \quad (3.10)$$

kde: Δp – pokles tlaku, přímo úměrný kvadrátu rychlosti proudění vzduchu

\dot{V} – objemový průtok, přímo úměrný rychlosti proudění vzduchu

Příkon větráku je tedy závislý na třetí mocnině rychlosti proudícího vzduchu. Pokud je potřeba zdvojnásobit rychlost proudění vzduchu, je nutné zvýšit energii potřebnou pro napájení větráku 8 krát. Samozřejmě toto není efektivní řešení jak snižovat teplotu ohřívání plochy.

Zvětšení ohřívání plochy

Další vlastnost, která má zásadní vliv na nárůst teploty ohřívání plochy je velikost této plochy. Pokud nebude brána v potaz kondukce, je možné k závislosti mezi velikostí ohřívání plochy a tepelným odporem mezi ohříváním plochou a jejím okolím dojít z Rovnic 3.5 a 3.6.

Nesmíme zapomenout na to, že součinitel přestupu tepla se mění při každé změně geometrie chladiče. Skutečné chladiče mají také tepelný odpor proti šíření tepla, který snižuje efektivitu přidávané chladicí plochy. Tento tepelný odpor je závislý na konduktivitě materiálu, ze kterého je chladič vyroben.

Tepelný odpor chladiče se pak skládá z odporu způsobeného kondukcí a z odporu způsobeného konvekcí.

3.3 Postup při návrhu pasivního chladiče

Ve většině případů jsou při návrhu chladiče pro pasivní chlazení známy tyto parametry: maximální dovolená teplota na PN přechodu LED diody, teplotní odpor mezi diodou a základnou chladiče, disipativní výkon LED diody a typ konvekce.

Pro výpočet požadovaného teplotního výkonu chladiče neboli tepelného odporu chladiče je možné využít následující vztah (Rovnice 3.11).

$$R_{sa} = \frac{T_{max} - P_{dis} \cdot (R_{CS} + R_{ca}) - T_a}{P_{dis}} \quad (3.11)$$

kde: R_{ca} – celkový tepelný odpor chladiče

P_{dis} – disipativní výkon tepelného zdroje

R_{CS} – tepelný odpor na spoji zdroje tepla a chladiče

T_{max} – maximální dovolená teplota na PN přechodu

T_a – okolní teplota.

Pro návrh optimální tloušťky žeber je zapotřebí znát požadovanou výšku žebra, délku žebra, součinitel přestupu tepla a tepelnou vodivost materiálu. Tloušťka žebra může být považována za proměnnou pro dosažení požadované účinnosti v rozsahu 0,85 až 0,94. Vyšší hodnoty znamenají neefektivní využití materiálu pro nízký pokles teploty a prostor by měl být lépe využitý pro mezery mezi žebry – pokles tlakového rozdílu atd.

Při návrhu tloušťky žeber je možné vyjít z těchto vztahů (Rovnice 3.12 a 3.13):

$$m = \sqrt{\frac{H_{tr} \cdot (2 \cdot (f_l + f_t))}{\lambda \cdot f_l + f_t}} \quad (3.12)$$

$$\eta = \frac{tgh(m \cdot f_h)}{(m \cdot f_h)} \quad (3.13)$$

kde: f_t – tloušťka žebra [mm]

f_l – délka žebra [mm]

f_h – výška žebra [mm]

m – pomocný parametr

λ – součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Při návrhu velikosti chladicí plochy je opět možné vyjít z rovnic 3.5 a 3.6. Výsledný vztah pro návrh chladicí plochy je pak možné vyjádřit takto:

$$A = \frac{1}{R_{SA} \cdot H_{tr} \cdot \eta} \quad (3.14)$$

Následně když známe požadovanou chladicí plochu, můžeme přizpůsobit rozměry a počet žeber. Posledním zbývajícím parametrem, který by měl být určen při návrhu chladiče pro pasivní chlazení, je velikost mezery mezi jednotlivými žebry. Při přirozené konvekci hraje orientace žeber vůči gravitaci velkou roli. Optimální odvod tepla nastane, pokud budou chladič vertikálně orientován, to znamená, že plochá žebra jsou rovnoběžná s gravitací. Pro případ vertikálně orientovaného chladiče byl na základě experimentů odvozen tento vztah:

$$S_{opt} = 2,714 \cdot \frac{f_l}{R_a^{1/4}} \quad (3.15)$$

kde: R_a – Rayleighovo číslo [-]

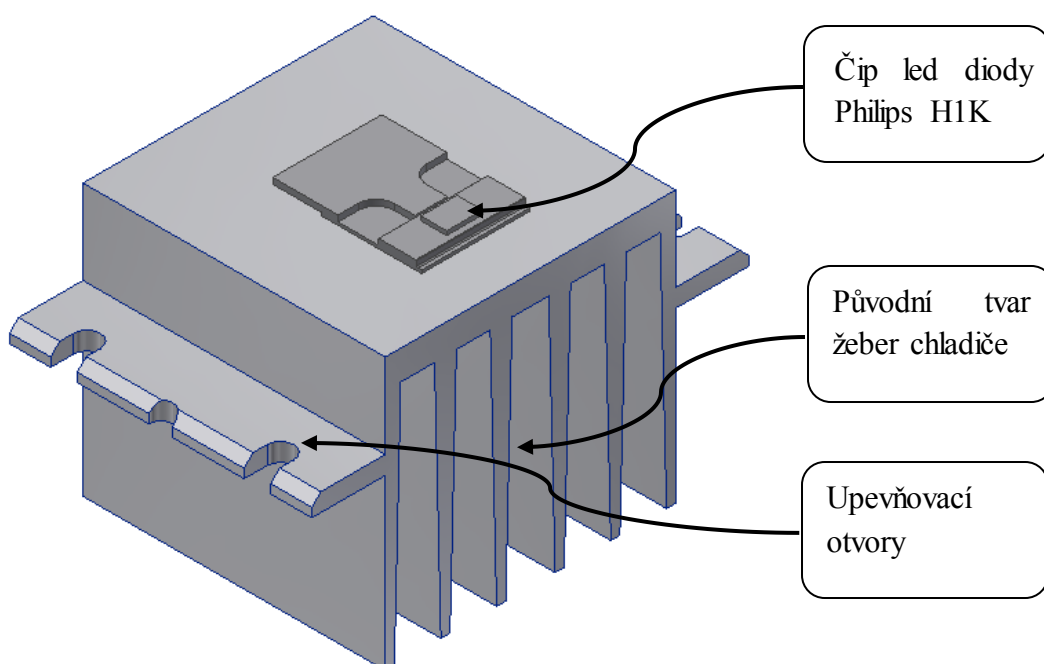
S_{opt} – velikost mezery mezi žebry [mm]

f_l – délka žebra ve směru gravitace [mm].

Pokud bude chladič orientován horizontálně, měla by být žebra chladiče nahrazena piny, protože při této orientaci není znám přesný směr proudění tekutiny, podle kterého by se přizpůsobila přímá žebra. Pokud by byl chladič orientován horizontálně a navíc piny dolů, je možné očekávat o 30 až 60 % vyšší tepelný odpor.

4 Optimalizace tvaru chladiče při pasivním chlazení

Společnost Varroc Lighting Systems jako zadavatel této práce dodala design hliníkového pasivního chladiče (viz Obrázek 4.1), který je používán ve vozech skupiny Jaguar Land Rover pro chlazení LED diod Philips H1K. Cílem této diplomové práce je optimalizovat tvar chladiče pro pasivní chlazení a dosáhnout snížení hmotnosti chladiče při zachování maximální teploty 125 °C pod čipem LED diody.



Obrázek 4.1: Původní design chladiče pro LED diodu Philips H1K

Prvním a zásadním požadavkem zadavatele práce bylo zachovat při optimalizaci jednoduchý design chladiče tak, aby se nezvýšily náklady na výrobu. Polotovary pro výrobu chladiče bude vyroben tvářením metodou protlačování, při které je materiál protlačován přes otvor, který udává tvar průřezu takto vyrobeného profilu. Touto metodou je možné při nízkých nákladech a v krátkém času vyrobit velké množství polotovarů, který se následně pouze nařeže na jednotlivé chladiče.

Dalším cílem práce je optimalizovat dodaný design tak, aby teplota na čipu LED diody nepřesáhla 125 °C a zároveň se minimalizovala hmotnost chladiče. Materiál chladiče je slitina hliníku 6061 a hmotnost neoptimalizovaného chladiče je 120 g. Dále je požadováno zachování upevňovacích otvorů pro ukotvení chladiče a zástavbového prostoru uvnitř světlometu.

Optimalizační studie chladiče bude provedena v těchto krocích:

- Měření příkonu LED diody v reálných podmínkách, měření teploty pod čipem
- Simulace ustáleného stavu při různých okolních teplotách v softwaru NX 9.0 Siemens a Ansys CFX
- Zkoumání vlivu natočení chladiče v gravitačním poli na maximální teplotu
- Optimalizace tvaru chladiče na teplotu 125 °C s maximální možnou úsporou materiálu

4.1 Měření příkonu LED diody Philips H1K a teploty pod čipem

Pro správné „naladění“ výpočtu bylo nejprve potřeba změřit příkon LED diody Philips H1K a teplotu pod čipem diody při tomto příkonu. Při stejném elektrickém napětí a se zvyšující se teplotou roste i proud, který diodou prochází. V případě elektrických spotřebičů je okamžitý elektrický příkon možno počítat jako:

$$P = U \cdot I \quad (4.1)$$

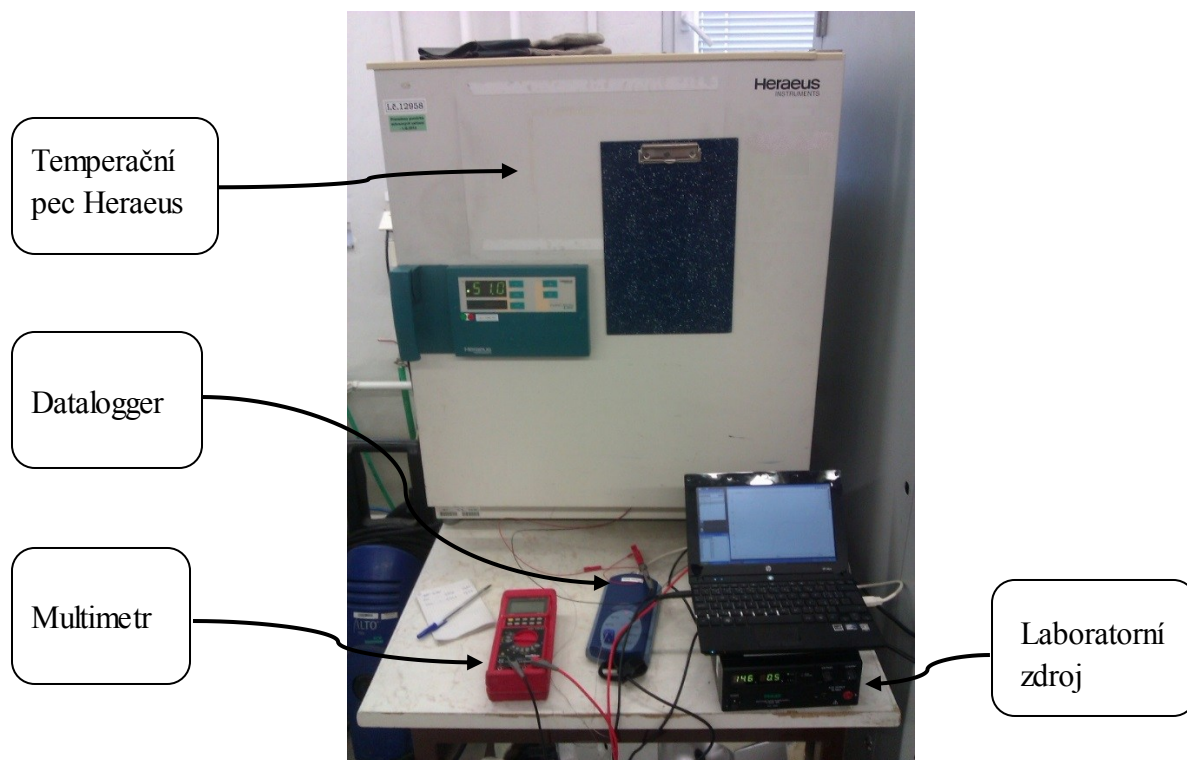
kde: P – okamžitý elektrický příkon [W]

U – napětí na zdroji [V]

I – elektrický proud procházející LED diodou.

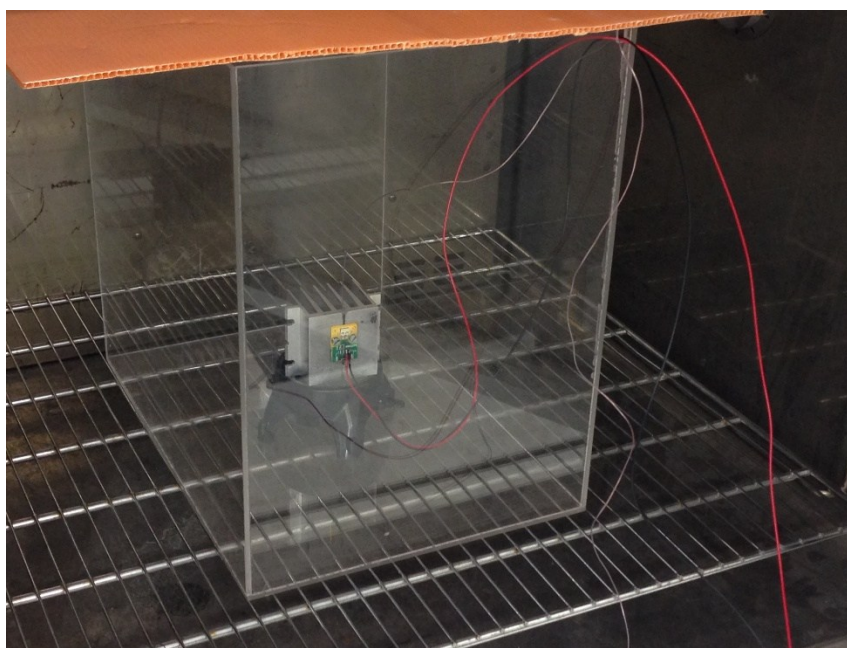
Disipativní výkon, který později bude zadáván do optimalizační studie chladiče, bude roven 85 % elektrického příkonu LED diody (85 % příkonu se přemění v teplo – viz kapitola 3). Bylo tedy zapotřebí měřit okamžité hodnoty elektrického proudu. Ke změnám napětí by v průběhu měření teoreticky nemělo docházet.

Na obrázku 4.2 a 4.3 je fotografie z měření okamžitého příkonu používané LED diody a teploty pod čipem. Při měření byla využita temperační pec značky Heraeus, regulovatelný laboratorní zdroj elektrického napětí, čidlo teploty umístěné pod čipem LED diody na chladiči (viz Obrázek 4.2), multimetr, speciální zapisovač pro zaznamenání dat, počítač a propojovací kabely.



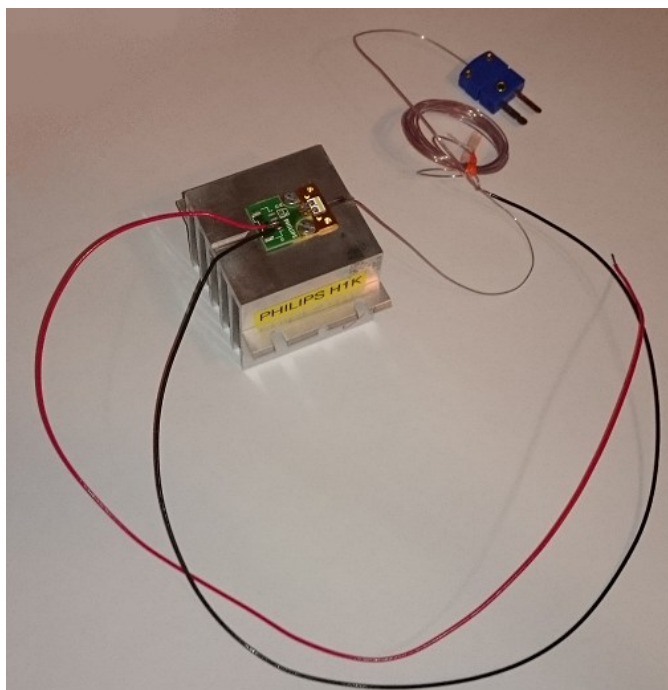
Obrázek 4.2: Sestava měření

Temperační pec Heraeus používá pro homogenizaci teplotního pole ventilátor. Proudění vzduchu v peci by však velice nepříznivě ovlivnilo získané výsledky. Bylo proto potřeba proudění odstínit a zajistit tak volnou konvekci jakožto hlavní princip šíření tepelné energie. Problém jsme vyřešili tak, že jsme celý vzorek umístili v peci do boxu z polykarbonátu (viz Obrázek 4.3).



Obrázek 4.3: Vzorek umístěný v polykarbonátovém boxu při měření

Na obrázku 4.4 je fotografie měřeného vzorku. Vzorek se skládá z chladiče, čipu LED diody, napájecích kabelů. Dále je na styčné ploše chladiče a LED diody vyfrézována drážka, ve které je umístěno čidlo s vodičem pro měření teploty.



Obrázek 4.4: Měřený vzorek

Postup měření teploty chladiče pod čipem a elektrického proudu:

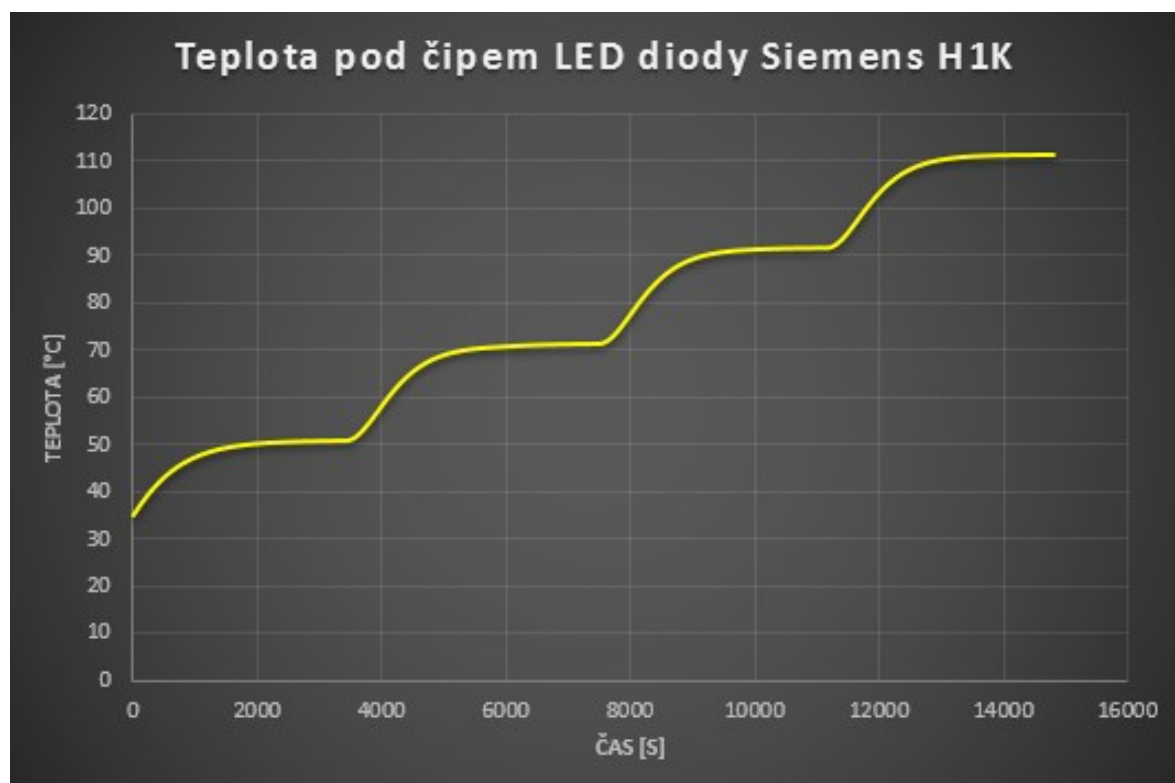
Nejprve bylo potřeba stanovit, při jakých podmínkách bude měření probíhat. Bylo rozhodnuto, že měření teploty chladiče pod čipem LED diody bude probíhat při čtyřech různých ambientních teplotách. Měření bude začínat na ambientní teplotě 35 °C a končit na teplotě 80 °C s krokem 15 °C. Pod pojmem ambientní teplota je potřeba si představit ustálenou teplotu v peci v okolí polykarbonátového boxu.

Po ustálení teploty na začátku měření bude zaznamenána teplota chladiče pod čipem a elektrický proud procházející čipem pro výpočet výkonu. Následně bude teplota v peci zvýšena o 15 °C a po ustálení teploty chladiče pod čipem budou opět zaznamenány sledované hodnoty. Takto bude měření probíhat až do ambientní teploty 80 °C. Po naměření posledních hodnot bude vzorek vyjmut z pece a bude zkontrolováno, zda nedošlo k nežádoucí změně elektrického napětí na kontaktech čipu oproti počátečnímu stavu.

Výsledky měření

Průběh teploty chladiče při měření je zaznamenán na grafu 4.1. Hodnoty byly zapisovány každých 10 vteřin a teplota byla považována za ustálenou, pokud v průběhu 3 minut kolísala pouze $\pm 0,02$ °C. Přesnost použitého teplotního čidla byla 0,01 °C. Ustálení na každé

ambientní teplotě trvalo zhruba 1 hodinu, celková doba měření byla 4 hodiny 20 minut. Po kontrole napětí na konci bylo ověřeno, že napětí se nezměnilo a zůstalo na 14,02 V.



Graf 4.1: Průběh teploty chladiče pod čipem Philips H1K

Podle rovnice 4.1 je možné dopočítat okamžité elektrické příkony pro všechny ustálené stavy. Naměřené parametry a dopočtený ztrátový teplotní výkon je zapsán v tabulce 4.1.

Teplota v peci [°C]	Elektrický proud [A]	Teplota chladiče pod čipem [°C]	Okamžitý elektrický příkon [W]
35	0,294	50,76	3,50
50	0,384	71,26	4,58
65	0,470	91,53	5,60
80	0,547	111,23	6,52

Tabulka 4.1: Měřené teploty a proudy při různých ambientních teplotách, okamžitý příkon LED diody

Při daném napětí by teoreticky bylo možné s teplotou okolního prostředí pokračovat i výše (čip má výrobcem garantovanou odolnost 135 °C), problém by však byl v elektrickém proudu. Při stanoveném napětí a teplotě kolem 100 °C by čipem teoreticky procházel

elektrický proud vyšší než 1A a takovýto proud by vzorek nemusel vydržet. Z časových důvodů jsme si nemohli dovolit riskovat poškození čipu a ztrátu jediného vyrobeného vzorku.

4.2 Teplotní analýza ustáleného stavu původního designu

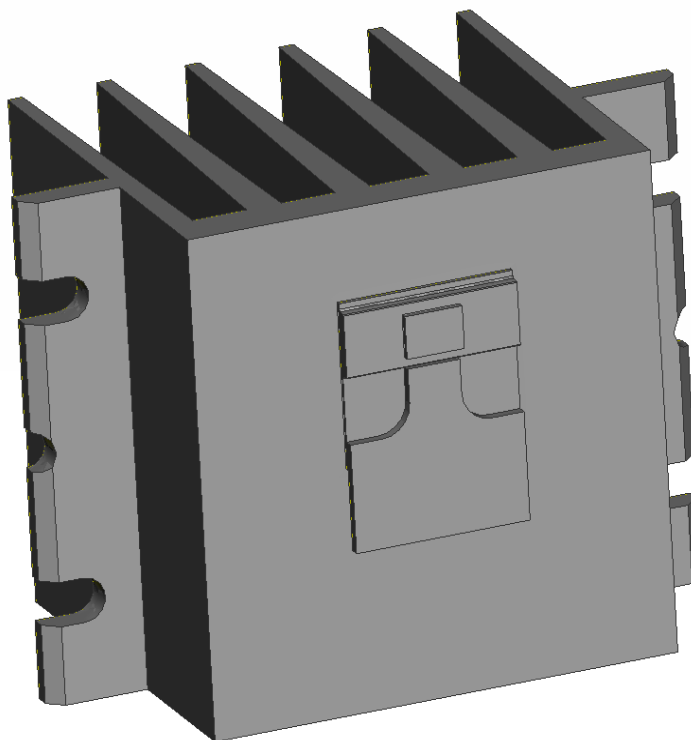
Dalším úkolem bude „naladit“ výpočet tak, aby odpovídal skutečným naměřeným hodnotám. Simulace ustáleného stavu bude probíhat v softwarech NX9.0 a CFX.

Jak je uvedeno v předchozí podkapitole, při měření teploty pod čipem LED diody v peci byl chladič umístěn v boxu (zajištění volné konvekce). Tento stav bylo zapotřebí nasimulovat i při analýze ustáleného stavu.

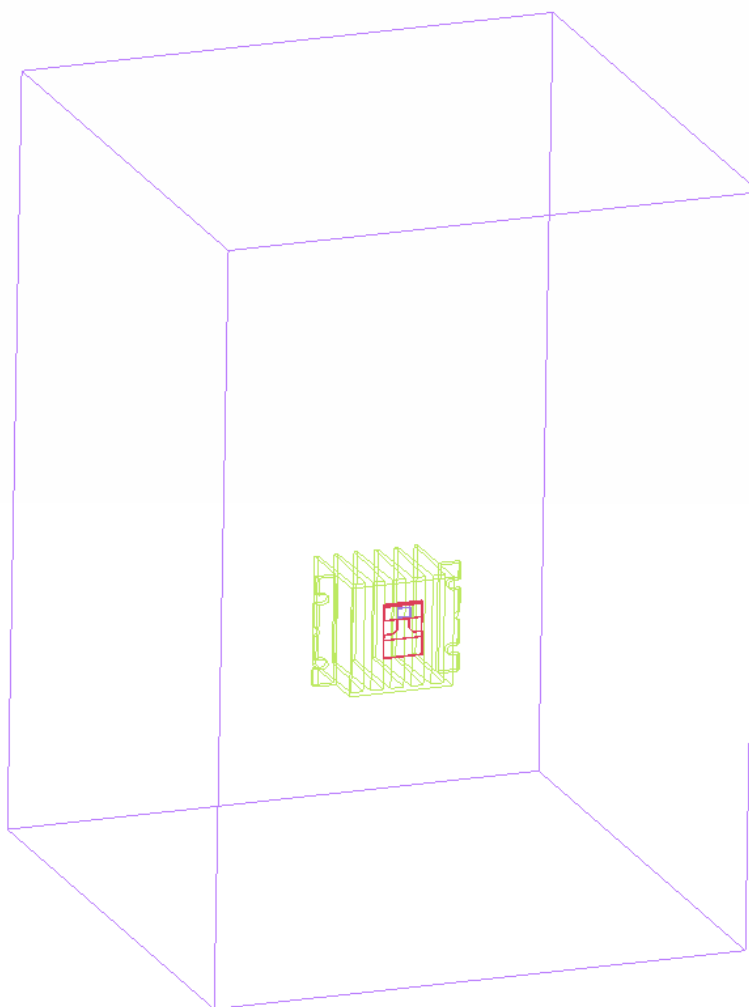
Budou provedeny čtyři teplotní simulace ustáleného stavu, při čtyřech různých okrajových podmínkách. V ideálním případě by se teploty naměřené pod čipem LED diody v peci měly shodovat s teplotami vypočtenými v softwaru NX9.0 a CFX.

4.2.1 Geometrie počítačového modelu a materiálové parametry

Pomocí zadaného modelu chladiče bude vytvořena geometrie chladiče pro simulaci ustáleného stavu - SOLID. K chladiči pak bude potřeba vytvořit i model prostředí (vzduch), ve kterém bude probíhat volná konvekce - FLUID. Geometrie prostředí bude mít přibližně stejné rozměry jako box, ve kterém byl vzorek umístěn při měření v temperační peci (viz Obrázek 4.3).



Obrázek 4.5: Počítačový model chladiče s čipem LED diody- SOLID



Obrázek 4.6: Celkový geometrický model – FLUID + SOLID

Materiálové parametry

Jako vstupní hodnoty pro teplotní simulaci byly použity následující materiálové parametry:

Hliník – chladič, čip LED diody:

Hustota - $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$

Youngův modul - $E = 70 \text{ GPa}$

Poissonovo číslo - $\mu = 0,28$

Emisivita - $\varepsilon = 0,2$ (0,2 pro stříbrný chladič, 0,9 pro černěný)

Konduktivita - $\lambda = 190 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Vzduch – okolní prostředí:

Hustota vzduchu při 80°C - $\rho = 0,935 \text{ kg/m}^3$

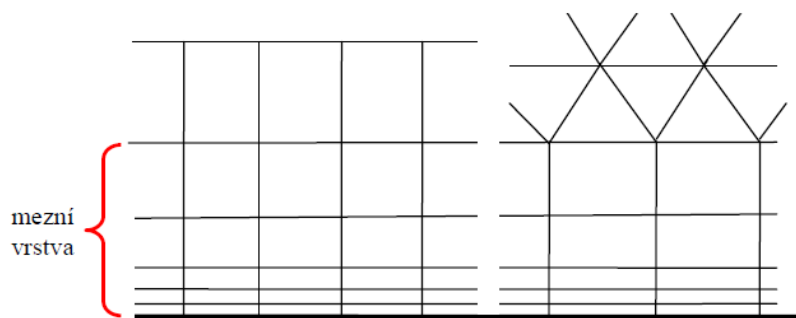
Tepelná roztažnost (důležité pro vztlakové síly) - $\alpha = 0,003365 \text{ K}^{-1}$

Referenční tlak - $p = 101325 \text{ Pa}$

Molární hmotnost - $M_m = 28,56 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$

4.2.3 Sít' konečných prvků

Sít' konečných prvků pro CFD analýzu má poněkud odlišné nároky na kvalitu než sít' konečných prvků pro strukturální analýzy. Hlavním rozdílem je nutnost zahuštění sítě v oblasti tzv. mezní vrstvy tekutiny. Mezní vrstva tekutiny je oblast v okolí pevné stěny, která je dominantně ovlivněna viskozitou tekutiny. Na obrázku 4.7 je schéma vhodného zahuštění elementů v mezní vrstvě, na obrázcích 4.12 - 4.14 je pak detail zahuštění sítě v mezní vrstvě (generované v softwaru Ansys Workbench a ANSA) tak, jak bylo realizováno na našem výpočetním modelu ustáleného stavu původního designu.

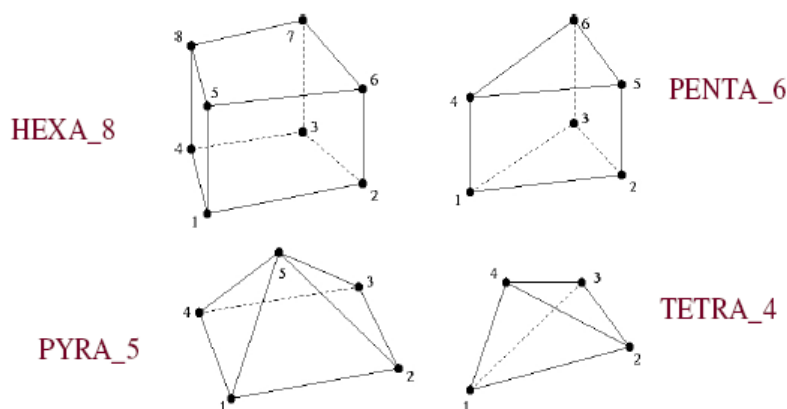


Obrázek 4.7: Schéma vhodného zahuštění sítě konečných prvků v mezní vrstvě

Rozdíly mezi elementy typu Tetrahedral a Hexahedral v CFD

Obecně je při volbě typu elementu upřednostňován tzv. quad-hexahedr element (viz Obrázek 4.8). Hexahedral elementy jsou výhodnější z hlediska úspory paměti a výpočetního času, ale hlavně z hlediska kvality popsání mezní vrstvy. Prvním zásadním důvodem pro použití elementu typu Hexahedral v CFD analýze jsou rozdílné gradienty v oblasti mezní vrstvy. Zjednodušeně řečeno, gradient teploty a rychlosti ve směru proudění je mnohem menší než kolmo na směr proudění. Z toho důvodu není potřeba jemná sít' ve směru proudění, ale kolmo na směr proudění je potřeba mít velmi zahuštěnou sít'. Pokud bychom pro tvorbu sítě mezní vrstvy využívali čtyřstěny, museli bychom sít' tvořit velmi malými elementy (při zachování požadovaného parametru Aspect ratio. Pro kvalitní konečnoprvkovou sít' mezní vrstvy je možné použít také elementy typu Pentas. Tento typ elementu vychází z trojúhelníkového plošného elementu stěny, a proto je možné tímto typem elementu vytvořit

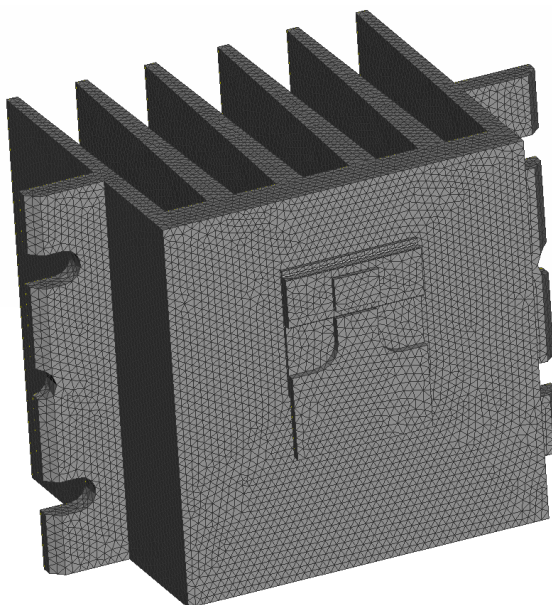
mezní vrstvu v okolí velmi složité stěny. Právě element typu Pentas bude v této práci použitý pro konečnoprvkovou síť mezní vrstvy jak v softwaru ANSA, tak v softwaru Ansys Workbench.



Obrázek 4.8: Objemové typy elementů [9]

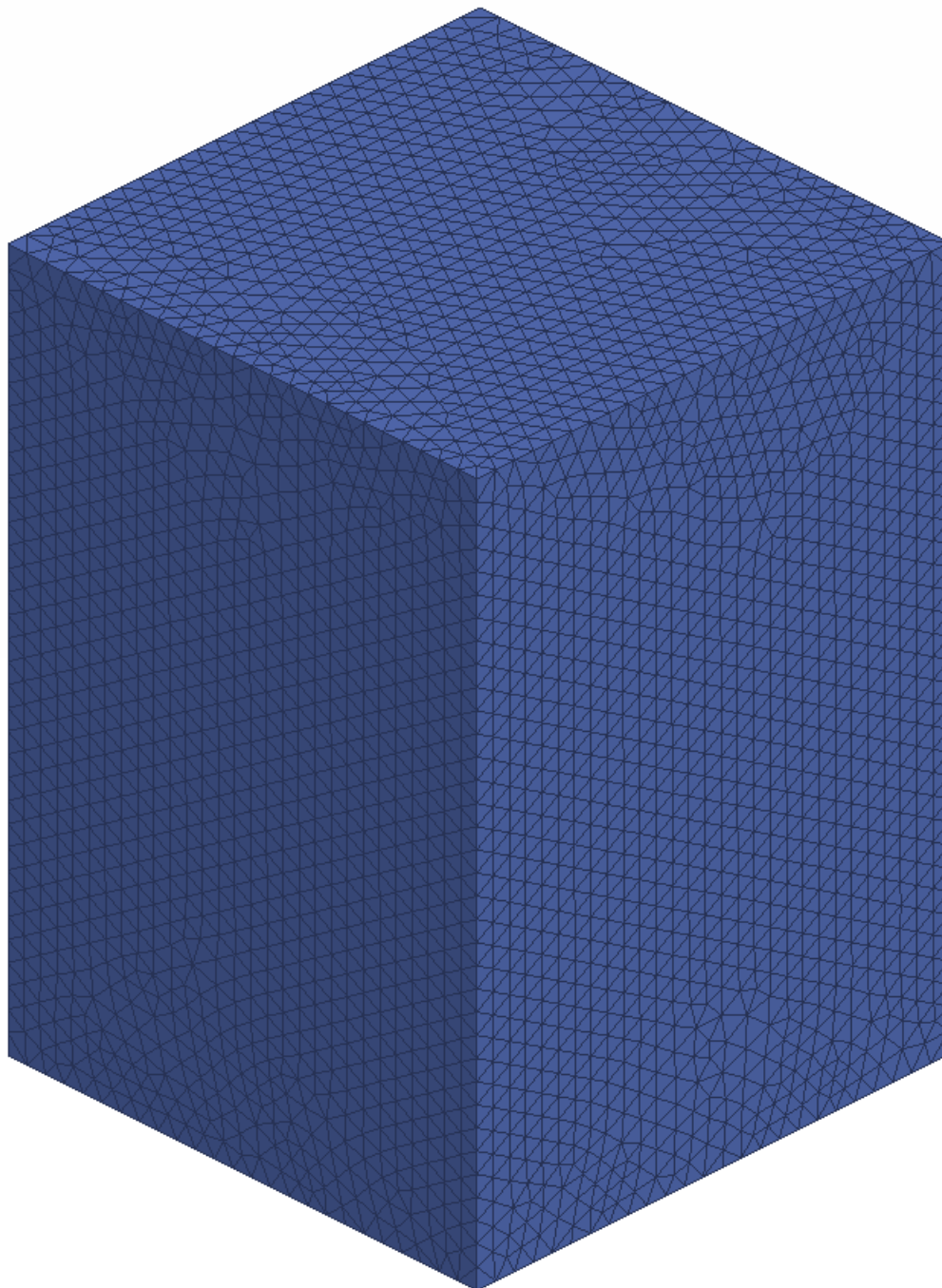
Síť konečných prvků v softwaru ANSA

Pro simulace v softwaru NX 9.0 Siemens bude síť konečných prvků generována v softwaru ANSA. V softwaru ANSA se síť konečných prvků tvoří poněkud jinak než v jiných softwarech. Nejprve se vytvoří konečnoprvková síť na všech plochách, na které se aplikuje vhodná velikost sítě. Tyto plochy se v případě složitější geometrie součásti „vysítují“ pomocí trojúhelníkových plošných elementů. Následně se z plošných elementů vygenerují objemové síť uzavřených oblastí. Pro dosažení dostatečně přesných výsledků je zapotřebí vytvořit jemnou, kvalitní síť a to zejména v oblasti mezní vrstvy.

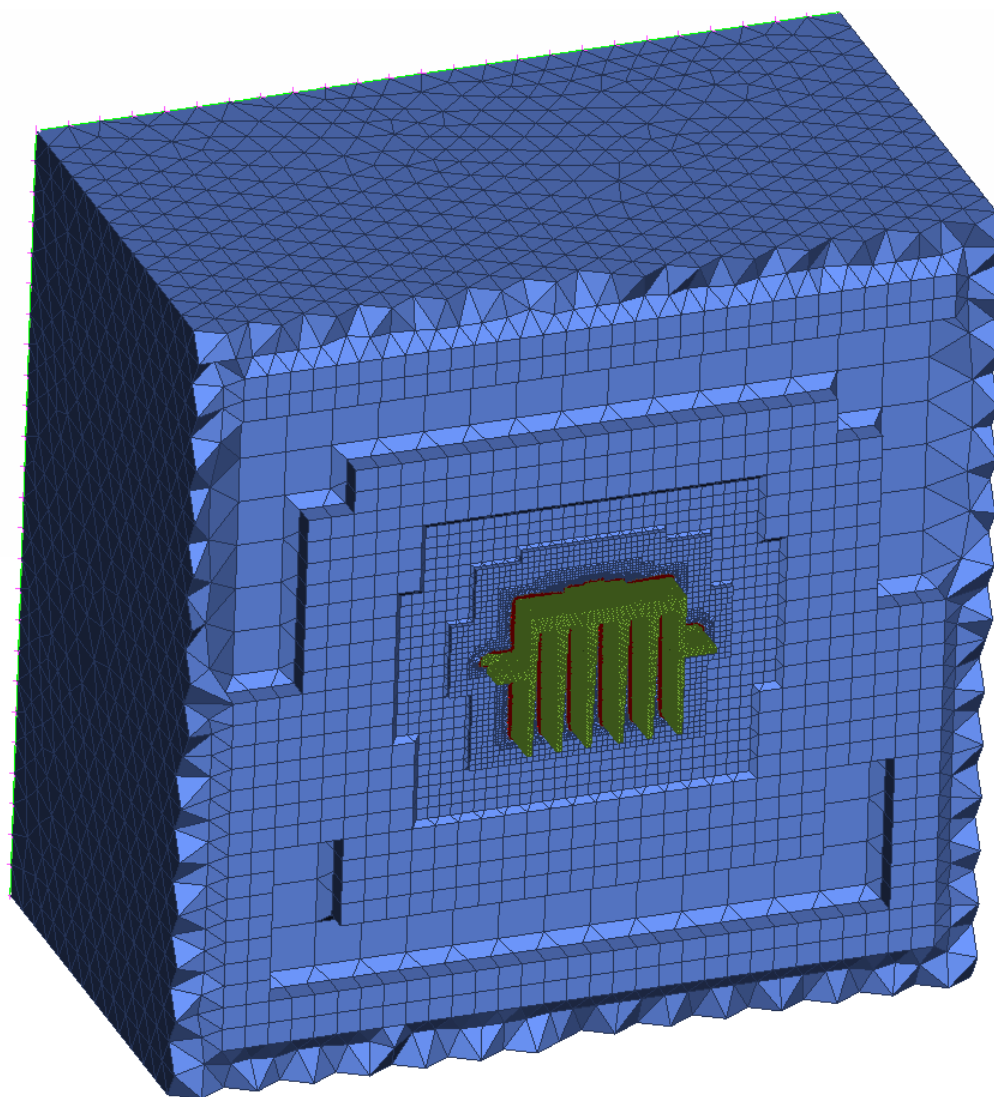


Obrázek 4.9: Síť konečných prvků vytvořená v softwaru ANSA na modelu chladiče pomocí 324 569 objemových elementů

V softwaru ANSA byla nejprve vygenerována plošná síť na všech plochách. Tato síť se skládá z 85 202 trojúhelníkových elementů. Následně byly vygenerovány objemové sítě mezní vrstvy pomocí funkce Layers a nakonec byla generována síť konečných prvků na okolním vzduchu. Objemová síť se celkem skládá z 2 005 173 elementů různých typů.

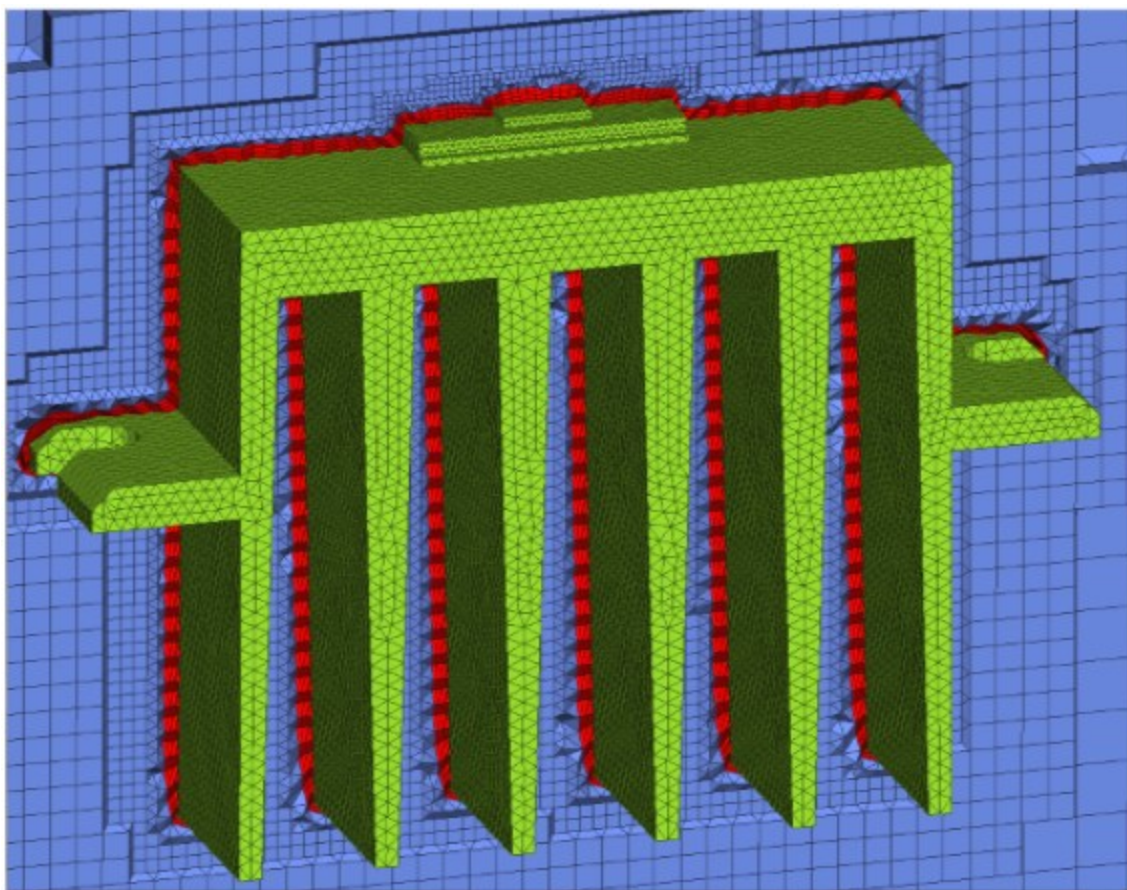


Obrázek 4.10: Síť konečných prvků vytvořená v softwaru ANSA na modelu vzduchu tvořená 1 680 604 objemovými elementy různých typů



Obrázek 4.11: Síť typu Hexa interior vytvořená v softwaru ANSA na modelu vzduchu v řezu

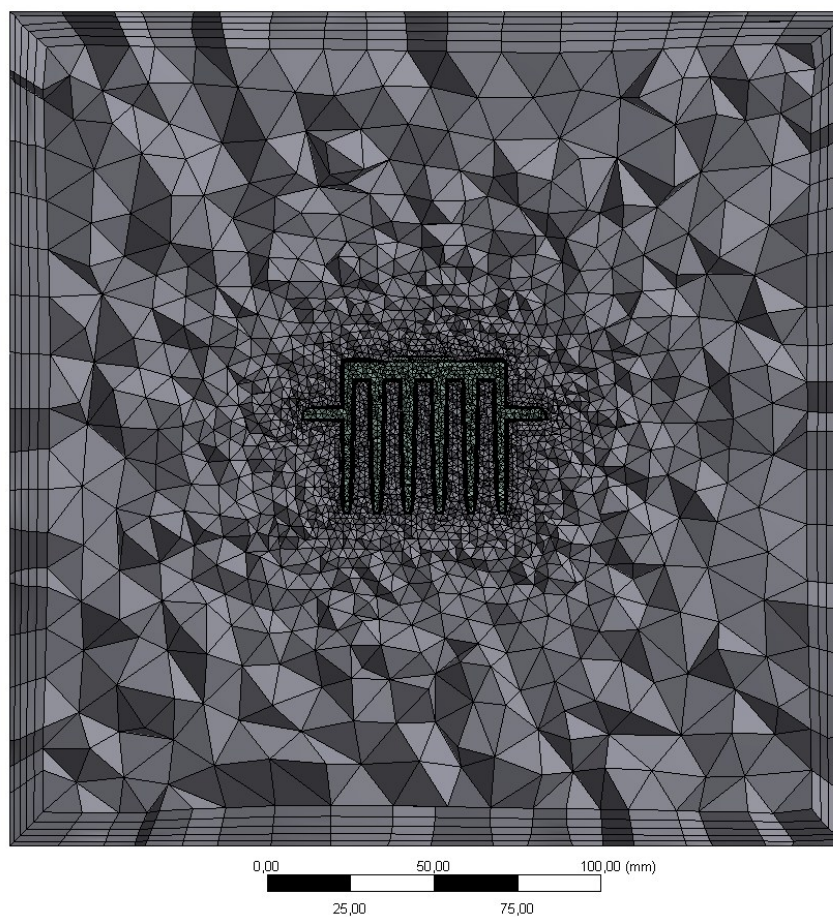
Jak je patrné na obrázku 4.11 síť konečných prvků na modelu okolního vzduchu byla v softwaru ANSA generována pomocí funkce Hexa interior. Takto generovaná síť je tvořena různými typy elementů. V blízkosti geometricky komplikovaných tvarů je síť tvořena pomocí elementů typu tetrahedral a ve volném prostoru je síť tvořena elementy typu hexahedral. Použitím této metody se výrazně sníží počet elementů při zachování požadované kvality sítě.



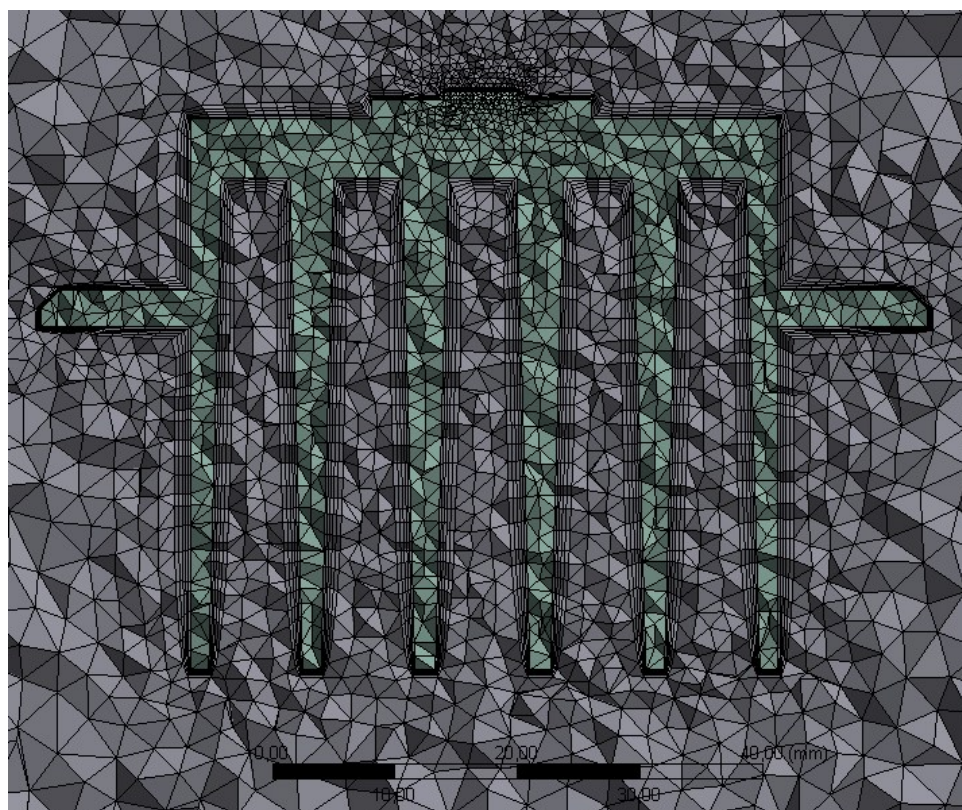
Obrázek 4.12: Detail sítě typu Hexa interior a sítě mezní vrstvy (červeně) vytvořené v softwaru ANSA na modelu vzduchu

Sít' konečných prvků v softwaru Ansys Workbench

Sít' konečných prvků chladiče vygenerovaná v softwaru Ansys Workbench pro výpočet v softwaru CFX je tvořena 591 802 objemovými elementy typu pentas a tetrahedral. Velikost elementů na modelu chladiče je nastavena na 1,6 mm a velikost elementů na modelu vzduchu je nastavena na 12 mm. Důležitým nastavením bylo definování parametru Inflation, tedy nastavení hustoty konečnoprvkové sítě v oblasti mezní vrstvy. Maximální počet vrstev byl nastaven na pět a parametr Growth ratio na hodnotu 1,2. Parametr Growth ratio udává nárůst tloušťky elementu typu Pentas se zvětšující se vzdáleností od stěny pevného tělesa. Na obrázku 4.13 je konečnoprvková sít' na kritickém řezu vytvořená v softwaru Ansys Workbench a na obrázku 4.14 je detail konečnoprvkové sítě mezní vrstvy v totožném řezu.



Obrázek 4.13: *Sít' konečných prvků na kritickém řezu vytvořená v softwaru Ansys Workbench*



Obrázek 4.14: *Detail sítě mezní vrstvy na kritickém řezu vytvořené v softwaru Ansys Workbench*

4.2.4 Okrajové podmínky a další nastavení teplotní analýzy

Určení modelu proudění

Bylo potřeba určit, zda bude v našem případě docházet k laminárnímu či turbulentnímu proudění a podle toho nastavit výpočetní model. V případě přirozené konvekce nerozhoduje o typu proudění Reynoldsovo číslo ale Rayleighovo číslo. Rayleighovo číslo je možné vypočítat takto:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3 \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\mu \cdot \lambda} \quad (4.2)$$

kde: g – tíhové zrychlení

β – koeficient teplotní roztažnosti

ΔT – teplotní gradient

D – charakteristický rozměr oblasti

ρ – průměrná hustota proudící tekutiny

c_p – měrná tepelná kapacity proudící tekutiny

μ – dynamická viskozita tekutiny

λ – tepelná vodivost tekutiny

Podle naměřených teplot je možné dopočítat střední teplotu ve zkoumané oblasti, a to takto:

$$\bar{T} = \frac{T_a + T_{max}}{2} = \frac{80 + 116}{2} = 98^\circ C \quad (4.3)$$

Pro výpočet Rayleighova čísla proto použijeme vlastnosti vzduchu při teplotě 98 °C.

$$\begin{aligned} Ra &= \frac{9,81 \cdot 0,003365 \cdot (116 - 80) \cdot 0,35^3 \cdot 0,985^2 \cdot 1004,4}{18,31 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0261} = \\ &= 9,83 \cdot 10^7 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Pokud je:

$Ra < 10^8$ – laminární proudění

$10^8 < Ra < 10^{10}$ – turbulentní proudění

Vypočtené Rayleighovo číslo je ještě v intervalu pro laminární proudění, a proto nebude při analýze v softwaru CFX uvažován žádný turbulentní model a bude využit laminární model proudění.

Disipativní výkon

Dále pak budou použity hodnoty okamžitého příkonu LED diody vypočtené z proudu a napětí při každé ambientní teplotě (viz Tabulka 4.2). Tyto tepelné výkony budou zadány ve Watech na styčnou plochu čipu LED diody a těla čipu pomocí funkce Total source.

Teplota vzduchu [°C]	Okamžitý tepelný výkon [W]
35	3,50
50	4,58
65	5,60
80	6,52

Tabulka 4.2: Okamžité tepelné výkony LED diody použité v teplotních analýzách

Interface

Interface obsahuje všechny plochy společné pro dvě prostředí. Software NX.9.0 Siemens řeší rozhraní mezi dvěma prostředími sám a není potřeba okrajovou podmínku Interface nastavovat. Software CFX však toto neumí a je potřeba Interface ručně nastavit.

V této analýze bude v softwaru CFX zapotřebí nastavit dvě okrajové podmínky typu Interface. První Interface bude typu SOLID-SOLID s modelem GGI a bude aplikován na společné plochy LED diody a chladiče. Druhý Interface bude typu FLUID-SOLID opět s modelem GGI a bude aplikován na všechny společné plochy LED diody a vzduchu, případně chladiče a vzduchu.

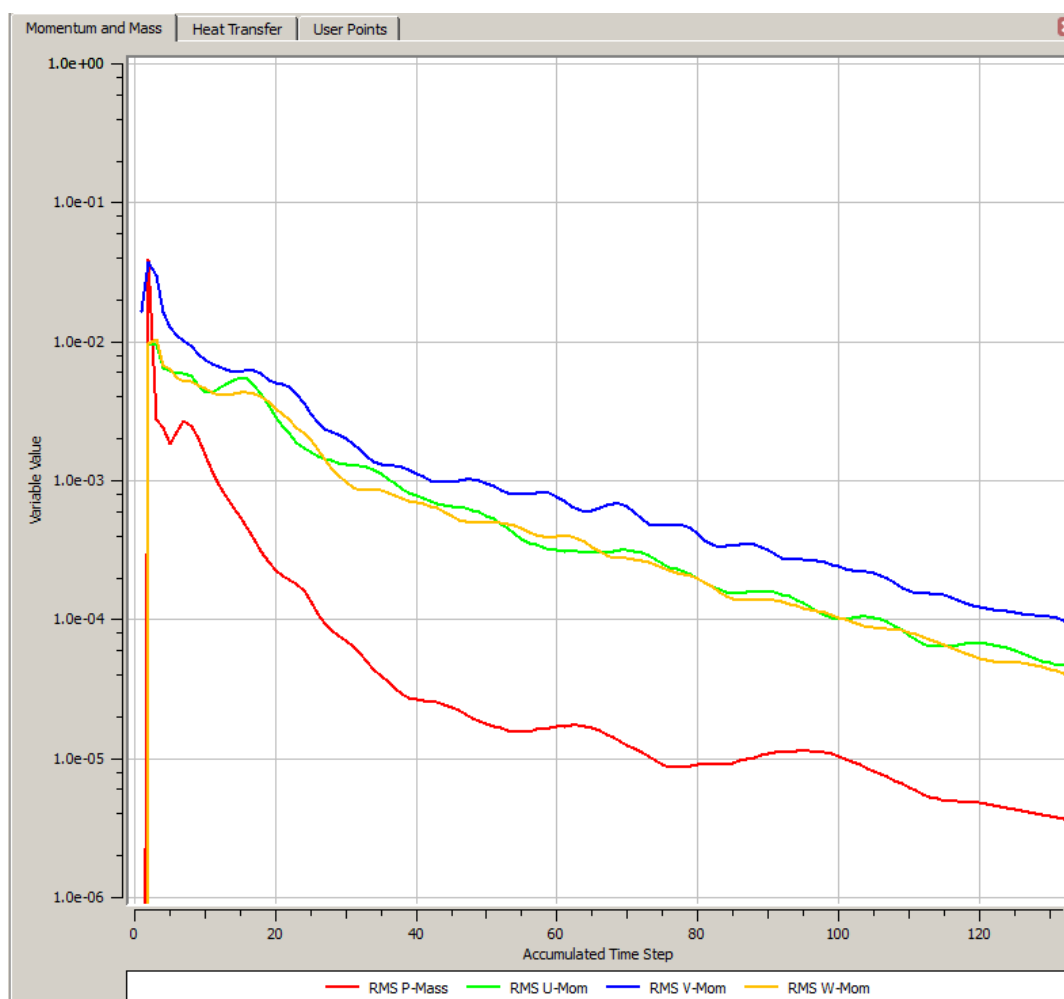
Wall

Okrajová podmínka typu Wall bude nastavena na vnější plochy modelu vzduchu. Zároveň bude teplota „stěny“ nastavena na 80 °C. Ve skutečnosti to znamená, že software dopočte tepelnou prostupnost stěny tak, aby při namodelované situaci byla teplota na stěně rovna 80 °C.

Residuály

Pro teplotní simulace bude nastaveno konvergenční kritérium na $1e^{-4}$ a maximální počet iterací na 500. Kontrola konvergence bude prováděna jak na RMS residuálech, tak i na průběhu maximální teploty na chladiči. Průběh RMS residuálů na chladiči bude zobrazen pouze pro jednu analýzu ustáleného stavu. Při ostatních analýzách byly tyto křivky velice podobné.

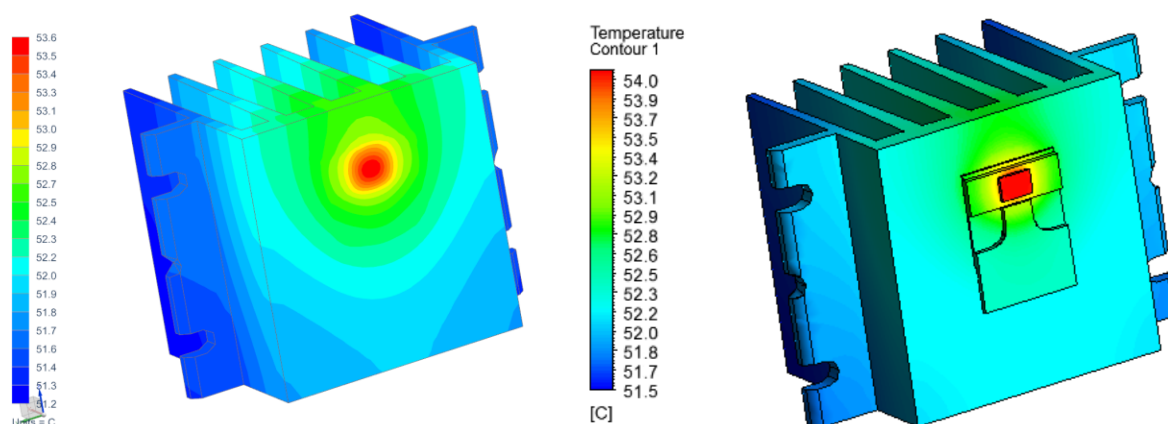
Výpočet pro ambientní teplotu 35 °C proběhl během 133 iterací a cílové RMS residuály klesly pod požadovanou hodnotu $1e^{-4}$. Tento jeden výpočet trval 1,6 hodin.



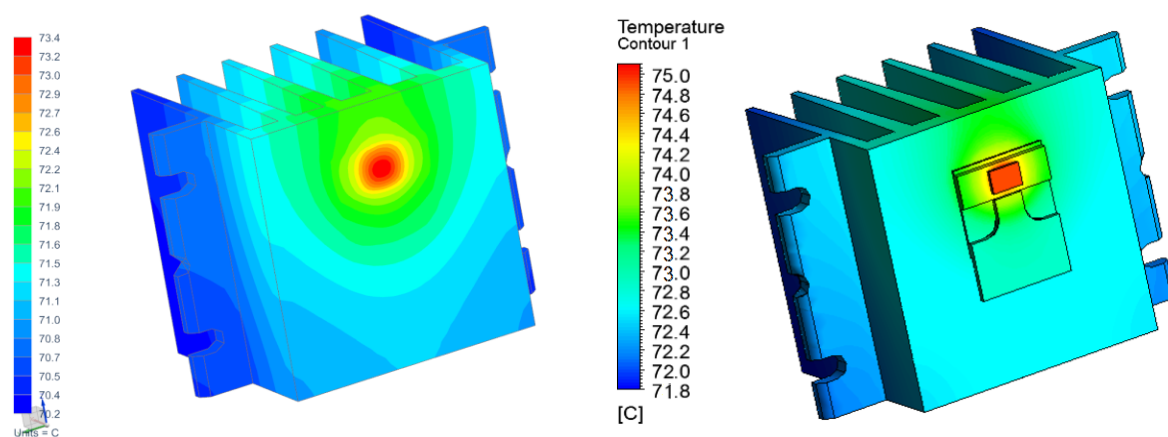
Obrázek 4.15: Průběh RMS residuálů

4.2.5 Rozložení teploty na chladiči při analýze ustáleného stavu

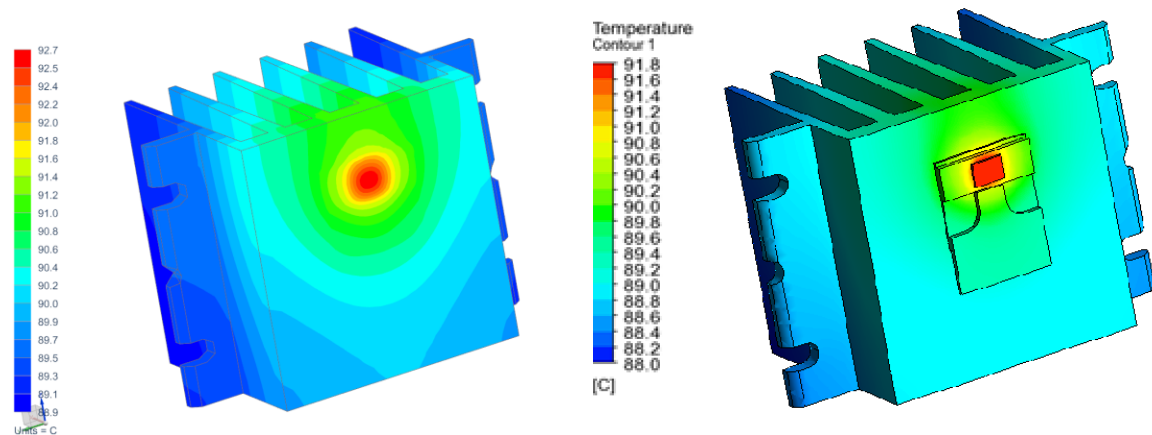
Vyhodnocení výsledků v softwaru Ansys CFX probíhá v modulu CFD-post. Výsledné rozložení teploty vypočtené v CFX je zobrazeno na obrázcích 4.16 až 4.19. Je zobrazeno jak na chladiči, tak i na čipu a tělese LED diody. Výsledné rozložení teploty vypočtené v NX9.0 Siemens je zobrazeno pouze na chladiči.



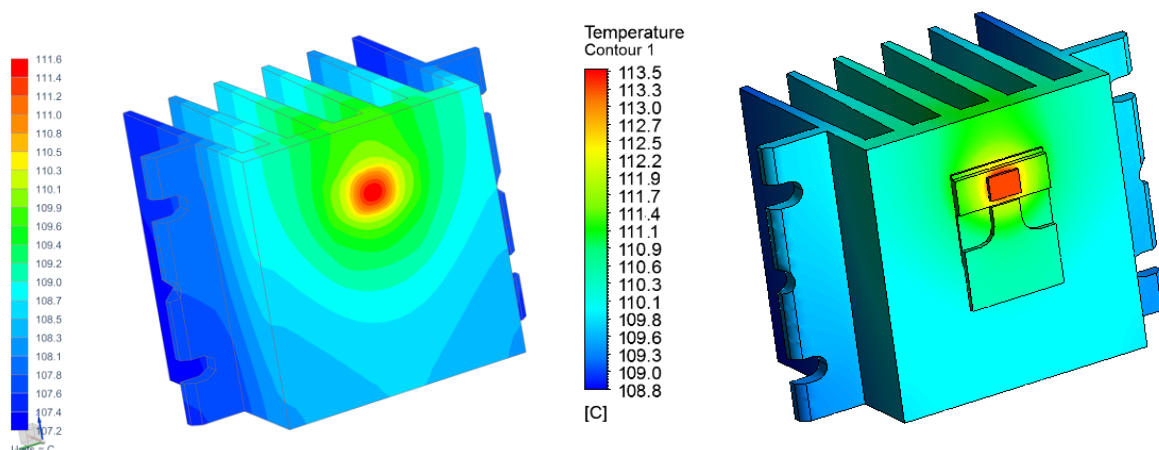
Obrázek 4.16: Porovnání výsledků NX 9.0 s CFX při ambientní teplotě 35°C a výkonu zdroje 3,5 W



Obrázek 4.17: Porovnání výsledků NX 9.0 s CFX při ambientní teplotě 50°C a výkonu zdroje 4,6 W



Obrázek 4.18: Porovnání výsledků NX 9.0 s CFX při ambientní teplotě 65°C a výkonu zdroje 5,6 W



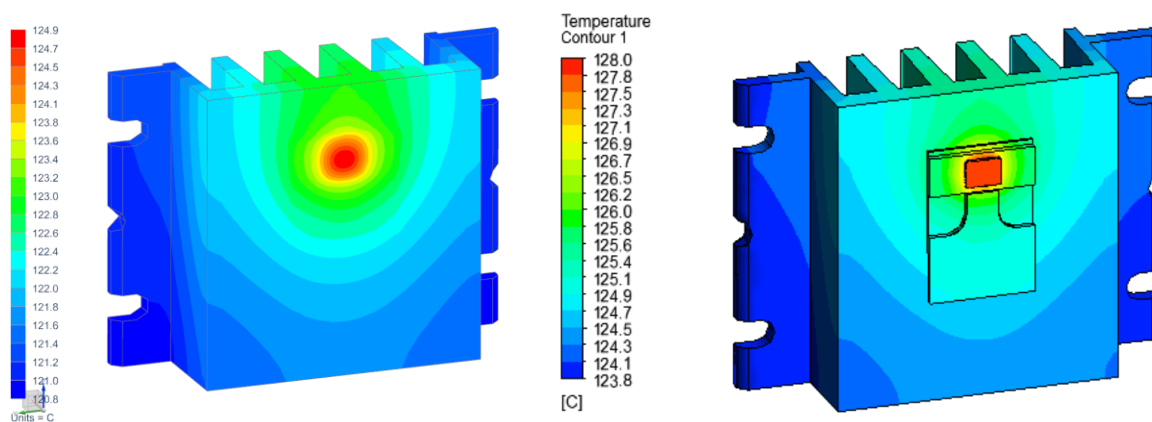
Obrázek 4.19: Porovnání výsledků NX 9.0 s CFX při ambientní teplotě 80°C a výkonu zdroje 6,5W

V tabulce 4.2 jsou zaznamenány mimo jiné i rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými teplotami. Odečet teploty pod čipem LED diody ve výpočtu v softwaru CFX byl proveden pomocí funkce Probe.

Ambient [°C]	Náměr [°C]	Výpočet NX [°C]	Rozdíl oproti náměru [°C]	Výpočet CFX [°C]	Rozdíl oproti náměru [°C]
35	50,8	53,6	2,8	51,7	0,9
50	71,3	73,4	2,1	72,7	1,4
65	91,5	92,7	1,2	89,8	1,7
80	111,2	111,6	0,4	112,9	1,7

Tabulka 4.2: Porovnání teploty pod čipem z měření a výpočtu v softwarech NX 9.0 a CFX

Dalším krokem budou verifikační simulace v softwaru NX 9.0 a CFX. Důvodem těchto dvou simulací je potvrzení předpokladu, že při změně geometrie chladiče se výsledky vypočtené oběma softwary budou shodovat. Pro tyto dvě simulace ustáleného stavu budou žebra chladiče zkrácena o 24 mm. Ambientní teplota bude 80 °C, výkon tepelného zdroje 6.52 W.



Obrázek 4.20: Porovnání teploty pod čipem LED diody při výpočtu v softwarech NX 9.0 a CFX (žebra jsou zkrácena o 24mm)

Výsledné maximální teploty na chladiči obou verifikačních simulací jsou zaznamenány v tabulce 4.3. Předpoklad, že při změně geometrie chladiče se výsledky vypočtené oběma softwary budou shodovat, se potvrdil.

Software	Původní design [°C]	Zkrácená žebra [°C]	Rozdíl [°C]
NX.9	111,6	124,9	13,3
CFX	112,9	126,7	13,8

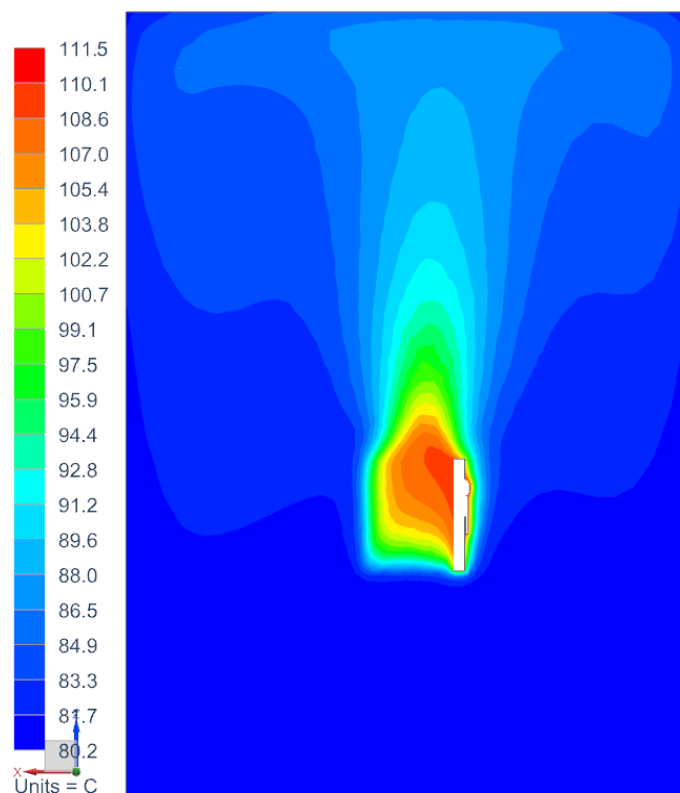
Tabulka 4.3: Výsledky verifikačních simulací při zkrácených žebrech chladiče

4.3 Analýza maximální teploty na čipu při natočení chladiče v gravitačním poli

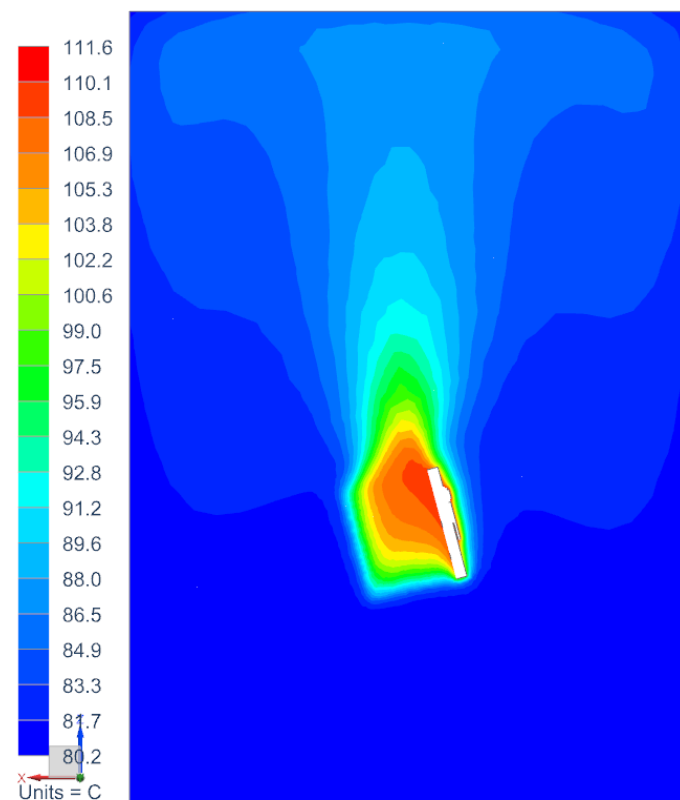
Orientace chladiče v gravitačním poli Země má při pasivním chlazení velký vliv na teplotní výkon chladiče. Jak již bylo řečeno v teoretické části, vertikální orientace chladiče (žebra jsou rovnoběžná se směrem gravitace) způsobí největší odvod tepla v důsledku vztlakových sil. Nejmenší odvod tepla a nejmenší teplotní výkon chladiče naopak nastane při horizontální orientaci chladiče.

V této podkapitole bude zkoumáno, jak velkou změnu maximální teploty způsobí změna orientace chladiče v gravitačním poli. Bude vypočteno 7 simulací ustáleného stavu při různých hodnotách natočení chladiče vzhledem ke gravitaci. První analýza bude při vertikální orientaci chladiče a postupně budeme chladič po 15° natáčet. Pro názornost budou výsledky vykresleny pouze v řezu v kritické rovině. Pro analýzu bude použita původní geometrie chladiče.

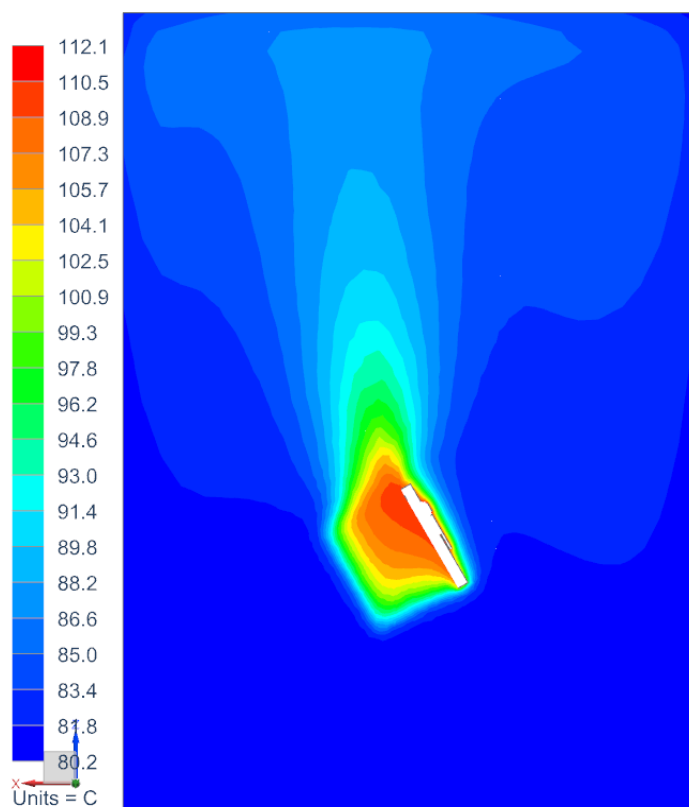
Pro názornost bude na obrázcích 4.21 - 4.27 zobrazeno rozložení teploty vzduchu na kritickém řezu. Maximální teplota na čipu LED diody pro každou ze sedmi simulací je zaznamenána v tabulce 4.3.



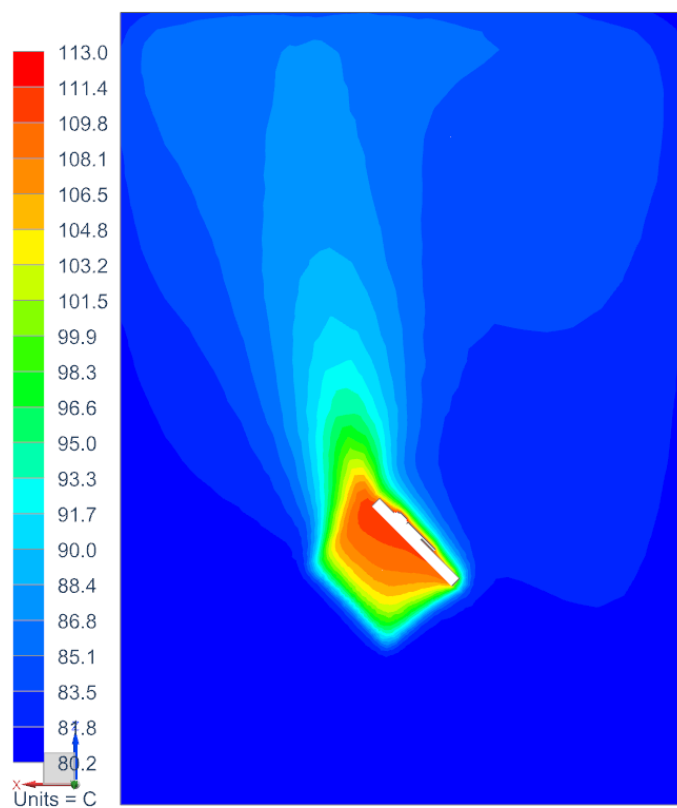
Obrázek 4.21: Rozložení teplot vzduchu na kritickém řezu při natočení chladiče 0°



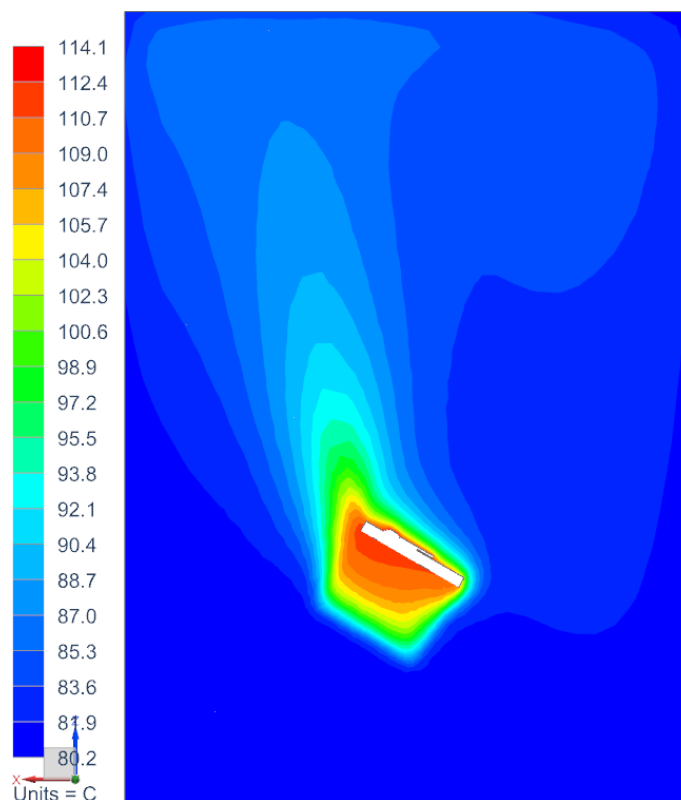
Obrázek 4.22: Rozložení teplot vzduchu na kritickém řezu při natočení chladiče 15°



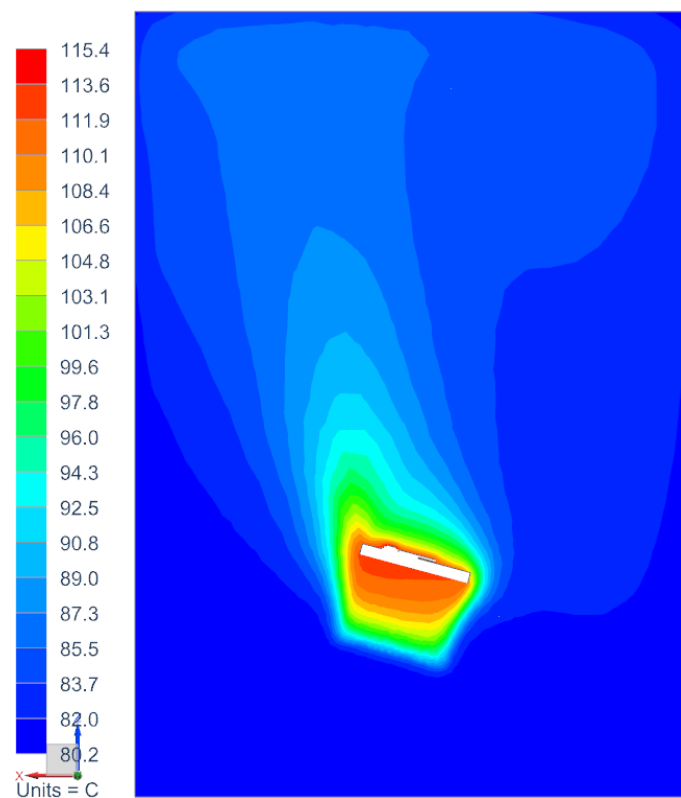
Obrázek 4.23: Rozložení teplot vzduchu na kritickém řezu při natočení chladiče 30°



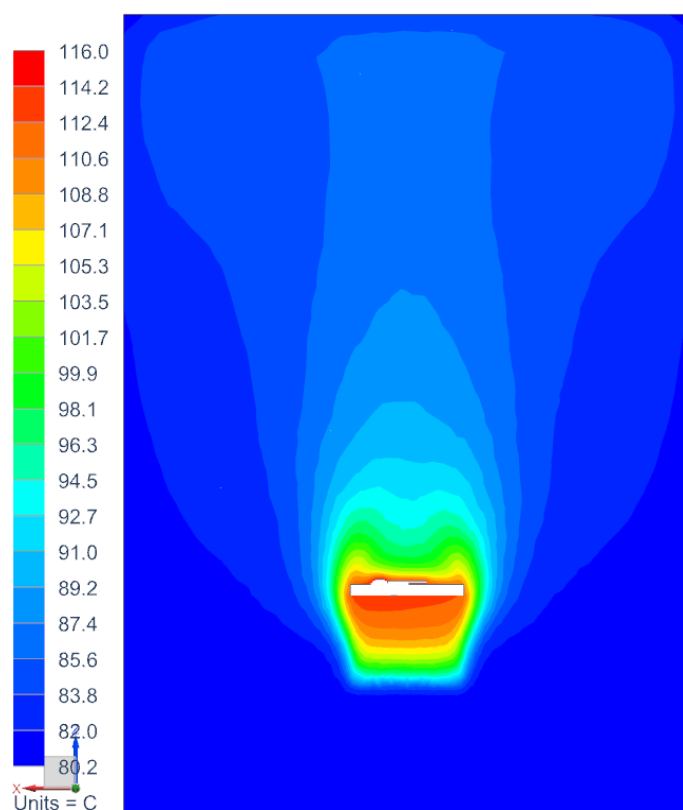
Obrázek 4.24: Rozložení teplot vzduchu na kritickém řezu při natočení chladiče 45°



Obrázek 4.25: Rozložení teplot vzduchu na kritickém řezu při natočení chladiče 60°



Obrázek 4.26: Rozložení teplot vzduchu na kritickém řezu při natočení chladiče 75°



Obrázek 4.27: Rozložení teplot vzduchu na kritickém řezu při natočení chladiče 90°



Graf 4.2: Maximální teplota na chladiči při natáčení vzhledem ke gravitaci

Při okolní teplotě 80°C a vertikální orientaci chladiče je nárůst teploty způsobený pouze disipativním výkonem LED diody. V tomto případě je nárůst teploty roven 31,5°C. Při horizontální orientaci chladiče (žebra směřují dolů) vzroste teplota o další 4°C. Rozdíl

oproti vertikální orientaci chladiče je tedy 12,7%. Orientaci chladiče v gravitačním poli při pasivním chlazení tedy rozhodně není možné zanedbávat.

Natočení [°]	Maximální teplota na chladiči [°C]
0	111,5
15	111,6
30	112,0
45	112,9
60	113,8
75	115,0
90	115,6

Tabulka 4.3: Maximální teploty v závislosti na natočení chladiče v gravitačním poli

4.4 Optimalizovaný tvar pasivního chladiče

Jak již bylo řečeno na začátku této kapitoly, společnost Varroc Lighting systems měla určité požadavky, které je při optimalizaci tvaru chladiče nutné dodržet. Cílem práce bude minimalizovat hmotnost chladiče při zachování požadavků, a snížit tak výrobní cenu chladiče. Maximální teplota pod čipem LED diody však nesmí překročit 125 °C a polotovary pro výrobu chladiče musí být vyrobitelné metodou protlačování. Ambientní teplota při optimalizaci chladiče bude 80 °C, jelikož obdobné teploty dosahuje vzduch ve světlometu při provozních podmínkách.

4.4.1 Určení minimální tloušťky žebra

Při optimalizaci chladiče bude v této práci postupně snižována tloušťka žebra. Metoda protlačování však má svá omezení. Bude proto potřeba určit minimální možnou tloušťku profilu vyrobitelnou touto metodou. Minimální vyrobitelná tloušťka profilu (viz Tabulka 4.4) se určuje na základě nejmenšího průměru kružnice (tzv. Circumscribed circle), která kompletně obsáhne vnější obrys vyrobeného tvaru. Minimální tloušťka stěny, na základě tabulky 4.4 [10], bude v případě optimalizovaného chladiče 1 mm.

Diameter of Circumscribed Circle (Inch)	6061 (Min. Wall Thickness)	2014 (Min Wall Thickness)	2024 7050 7075 (Min Wall Thickness)
0.5 - 2.0	0.040	0.040	0.040
2 - 3	0.045	0.050	0.050
3 - 4	0.050	0.050	0.062
4 - 5	0.062	0.062	0.078
5 - 6	0.062	0.078	0.094
6 - 7	0.078	0.094	0.109
7 - 8	0.094	0.109	0.125
8 - 9	0.109	0.125	0.156
9 - 10	0.109	0.125	0.156
10 - 11	0.125	0.125	0.156
11 - 12	0.156	0.156	0.156
12 - 14	0.188	0.188	0.188
14 - 17	0.188	0.188	0.188
17 - 20	0.188	0.188	0.250
20 - 24	0.188	0.250	0.500

Tabulka 4.4: Tabulka pro určení minimální výrobitelné tloušťky profilu [10]

4.4.2 Úprava designu chladiče, parametrické kótování

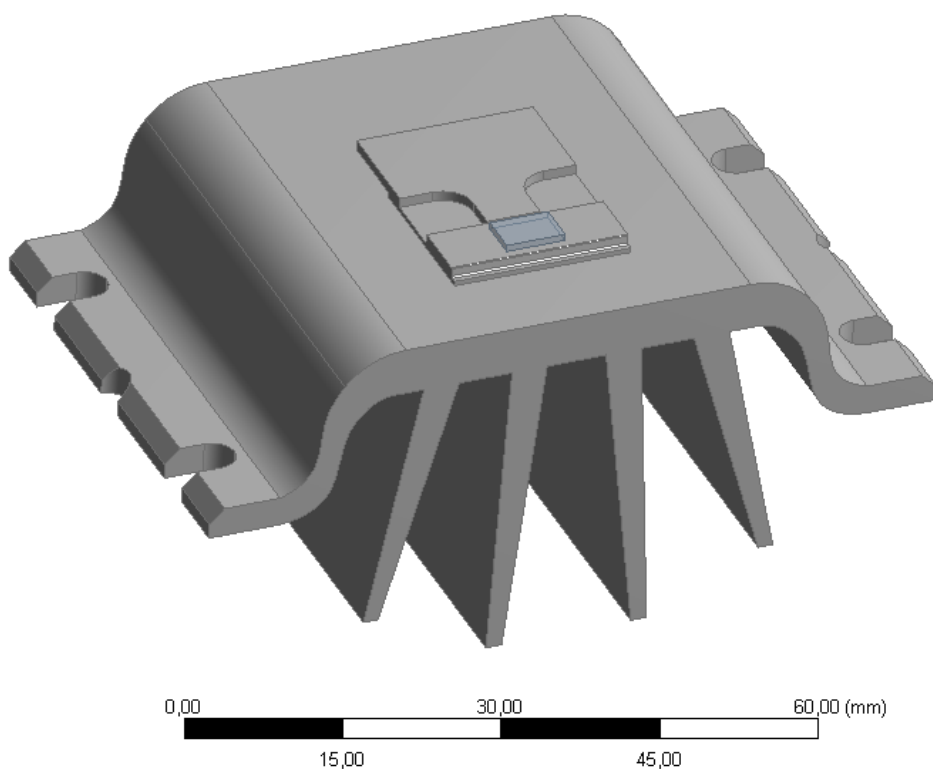
Při optimalizaci chladiče bude využito parametrické kótování a parametrická optimalizace v softwaru Ansys Workbench. Nejprve bude provedena úprava tvaru základny žebíř pod čipem LED diody. V dalším kroku budou navrženy tři nové tvary chladiče označené jako tvar A, B a C.

Tvar chladiče označený jako tvar A (viz Obrázek 4.28) má kromě bočních žebíř s upevňovacími otvory ještě čtyři vnitřní žebíř. Rozměry a umístění těchto žebíř jsou použity jako vstupní parametry optimalizace. Na obrázku 4.31 je kótovaný náčrt chladiče označeného jako tvar A, parametrické kóty jsou v tomto případě kóty s označením L21, L22, L24, L25, L26, L30, L31, H20, A23 a A29.

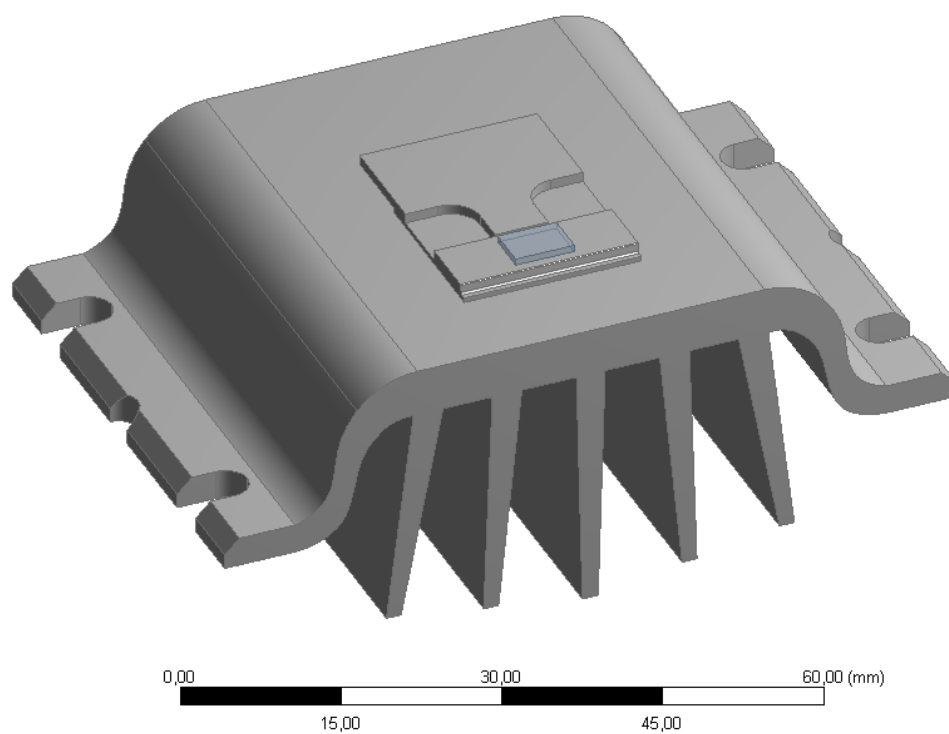
Tvar chladiče označený jako tvar B (viz Obrázek 4.29) má kromě bočních žebíř s upevňovacími otvory ještě pět vnitřních žebíř. Rozměry a umístění těchto žebíř jsou opět použity jako vstupní parametry optimalizace. Na obrázku 4.32 je kótovaný náčrt chladiče označeného jako tvar B a parametrické kóty jsou v tomto případě kóty s označením L21, L22, L24, L25, L26, L30, L31, H20, H34, V33, A23, A29 a A32.

Tvar chladiče označený jako tvar C (viz Obrázek 4.30) má opět dvě boční žebíř s upevňovacími otvory a kromě těchto má ještě pět vnitřních žebíř, z nichž tři jsou na koncích rozvětvená pro zvětšení chladicí plochy. Tloušťka základny žebíř pod čipem LED diody byla v tomto případě snížena a část takto „uspořádaného“ materiálu byla použita na rozvětvení žebíř. Tento postup vedl ke snížení hmotnosti chladiče a ke zvýšení jeho výkonu (viz níže). Tvar chladiče označený jako tvar C je už natolik složitý, že není možné jej parametricky kótovat.

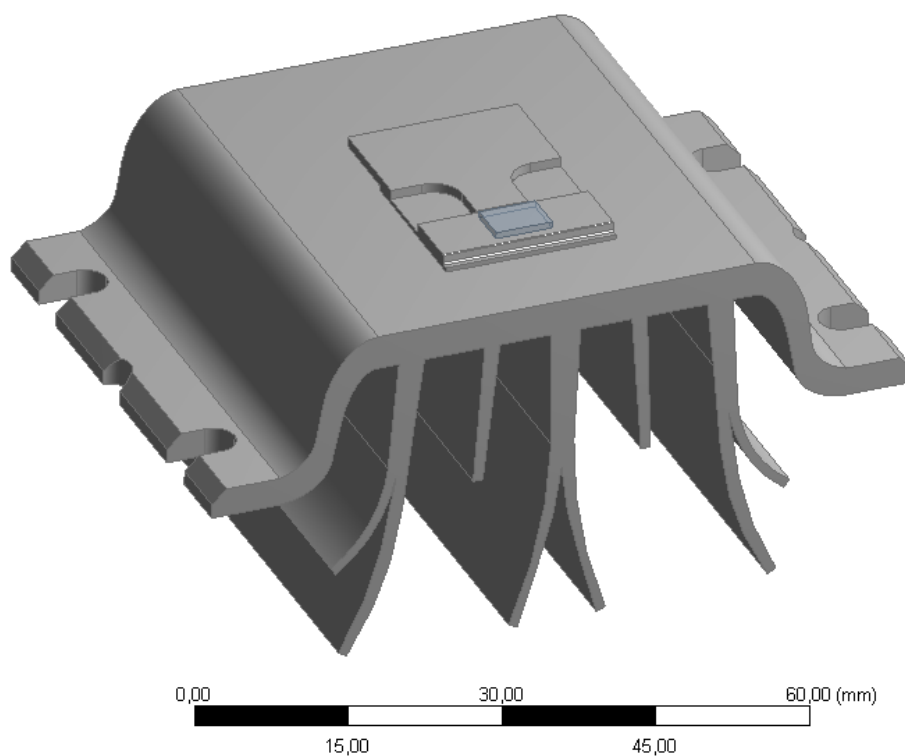
Tvar byl proto řešen pouze v několika variantách a v této práci je prezentována pouze nejvýhodnější varianta. Jak bylo řečeno výše, tvary chladiče A a B jsou kótovány parametricky a cílová maximální teplota na čipu LED diody je 125 °C. Tvar chladiče C není kótován parametricky a cílem při jeho úpravách bylo snížit maximální teplotu na čipu LED diody pod 125 °C a zároveň minimalizovat hmotnost chladiče.



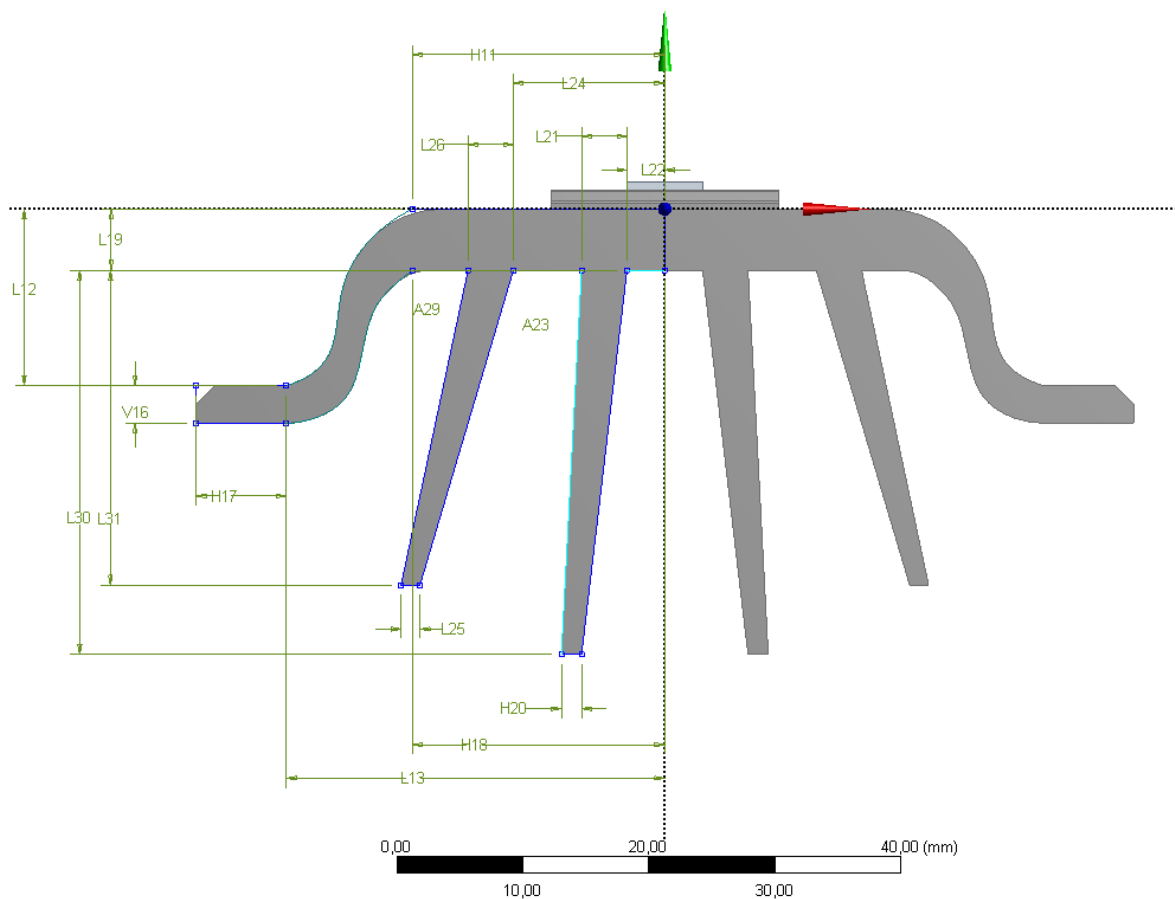
Obrázek 4.28: Počítačový model chladiče označeného jako A tvar



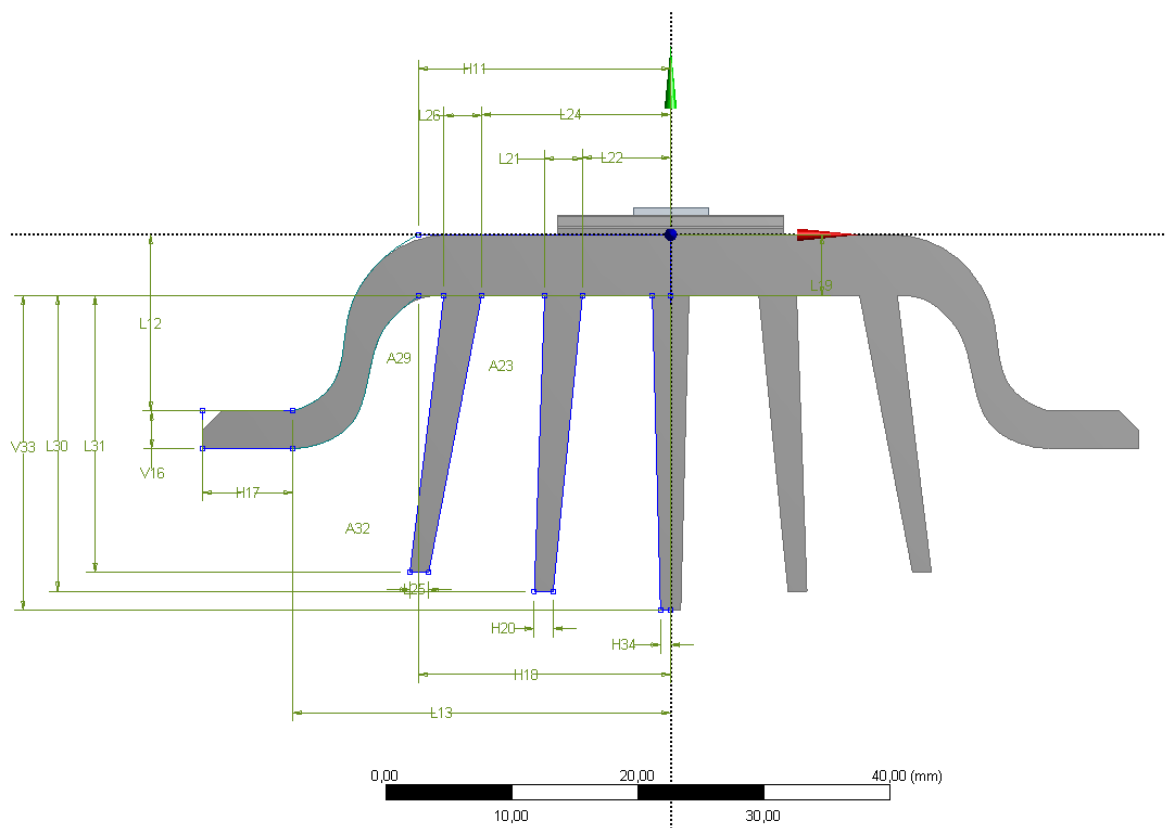
Obrázek 4.29: Počítačový model chladiče označeného jako B tvar



Obrázek 4.30: Počítačový model chladiče označeného jako C tvar



Obrázek 4.31: Parametricky kótovaný náčrt průřezu chladiče označeného jako A tvar



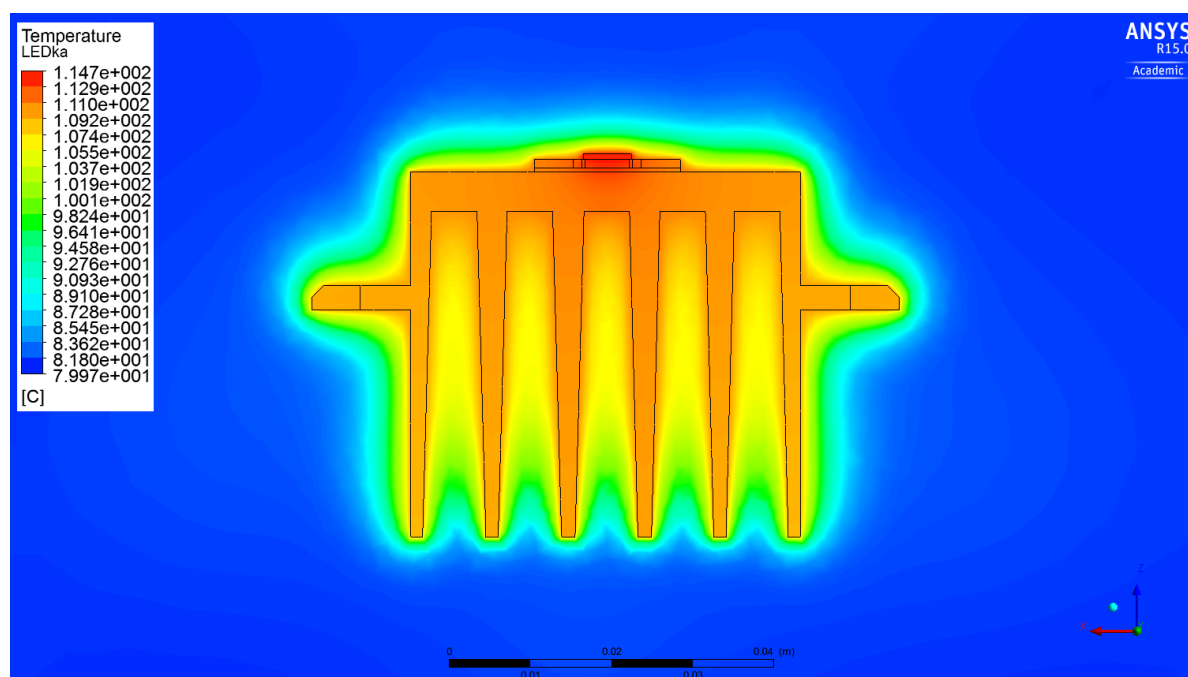
Obrázek 4.32: Parametricky kótovaný náčrt průřezu chladiče označeného jako B tvar

4.4.3 Nastavení analýzy ustáleného stavu při optimalizaci tvaru chladiče

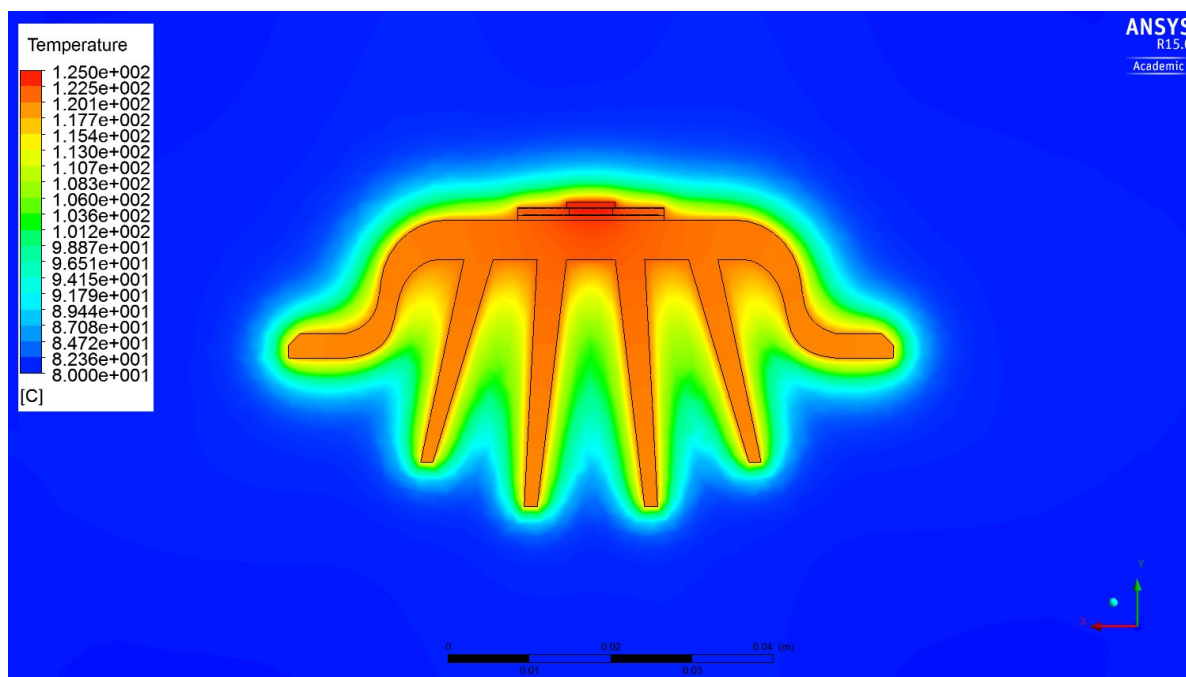
Při nastavení analýzy pro parametrickou optimalizaci tvaru chladiče byly využity naprosto stejné okrajové podmínky jako při analýze ustáleného stavu, které jsou již v podkapitole 4.2.2. Při analýze pro parametrickou optimalizaci byla okolní teplota nastavena na 80 °C a výkon LED diody na 6,54 W. Výstupním a tedy sledovaným parametrem byla při optimalizaci maximální teplota na čipu LED diody.

4.4.4 Rozložení teploty při analýze ustáleného stavu optimalizovaných tvarů chladiče

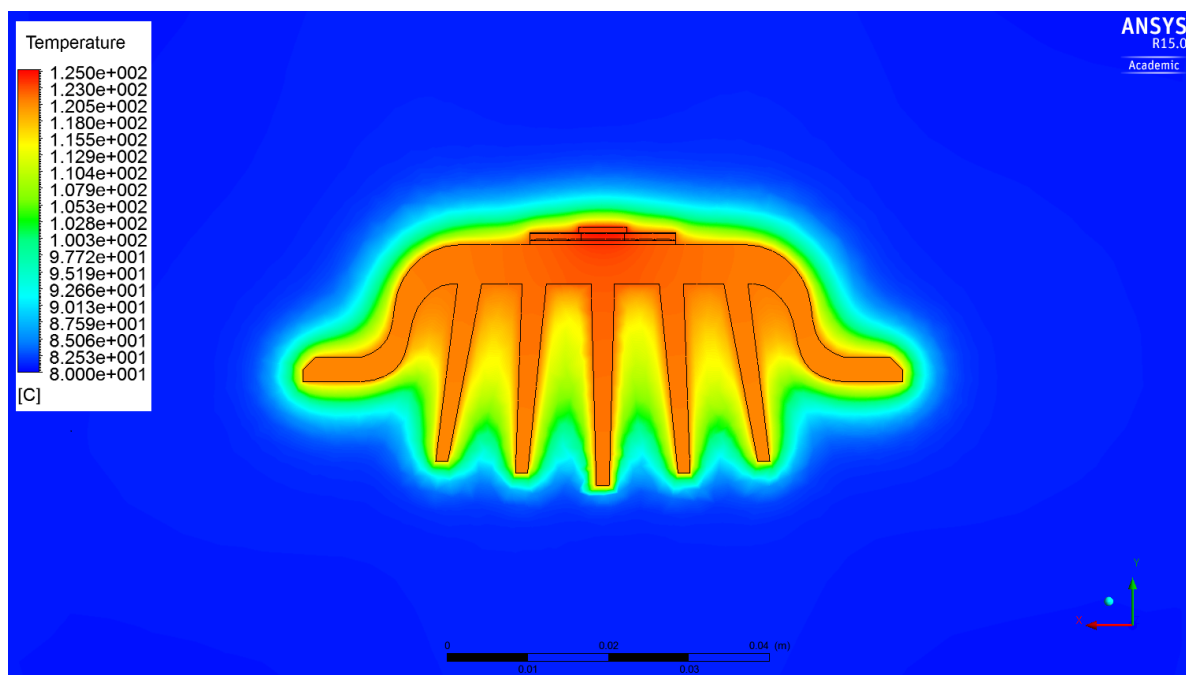
Rozložení teploty pro všechny optimalizované tvary je na obrázcích 4.34 až 4.36. Výsledky jsou pro názornost zobrazeny vždy pouze na kritickém řezu.



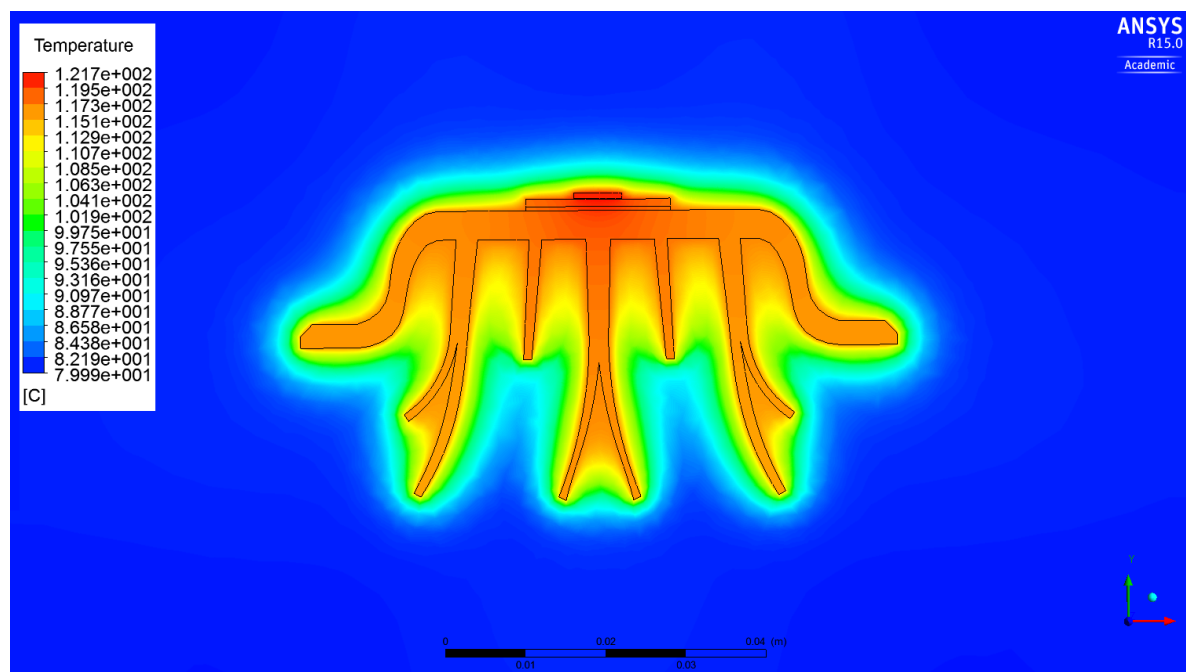
Obrázek 4.33: Rozložení teploty na kritickém řezu - původní tvar chladiče



Obrázek 4.34: Rozložení teploty na kritickém řezu – tvar chladiče A



Obrázek 4.35: Rozložení teploty na kritickém řezu – tvar chladiče B



Obrázek 4.36: Rozložení teploty na kritickém řezu – tvar chladiče C

Posledním bodem optimalizace je doporučení jednoho z navržených tvarů. Jak je patrné v tabulce 4.5, největší úspory materiálu bylo dosaženo tvarem chladiče C. Zároveň byla maximální teplota na čipu LED diody při použití tohoto tvaru chladiče nižší než požadovaných 125 °C, a tak tento tvar chladiče poskytuje jakousi „rezervu“ s ohledem na možnou úpravu výkonu LED diody.

	Objem chladiče [cm³]	Teplota čipu LED [°C]	Úspora materiálu [%]
Původní tvar	44,8	114,5	-
A tvar	31,8	125,0	29,0
B tvar	30,5	125,0	32,0
C tvar	27,0	121,7	39,7

Tabulka 4.5: Porovnání úspory materiálu a maximální teploty na čipu LED diody optimalizovaných tvarů

5 Závěr

V úvodu této práce byla stručně popsána teorie chlazení LED technologií. Byl kladen důraz na základní způsoby přenosu tepelné energie a obecné předpoklady, které je nutno brát v úvahu při návrhu chlazení LED technologií. Dále byl na jednoduchém příkladu demonstrován postup při návrhu chladiče pro pasivní chlazení s ohledem na velikost chladičích plochy a důležité rozměry žeber.

Cílem této diplomové práce bylo optimalizovat tvar chladiče, který je používán ve vozech skupiny Jaguar Land Rover pro pasivní chlazení LED diody Philips H1K. Původní tvar chladiče dodala firma Varroc Lighting Systems, která byla zároveň zadavatelem této diplomové práce. Při optimalizaci tvaru chladiče bylo zapotřebí brát v úvahu požadavky společnosti Varroc Lighting systems. Zásadním požadavkem byla maximální možná úspora materiálu chladiče. Dalším požadavkem bylo zachování jednoduchého tvaru chladiče a s tím související nízké výrobní náklady. Jako nejjednodušší a nejlevnější metoda pro výrobu polotovarů na chladičů je metoda protlačování. Z toho důvodu byly všechny úpravy tvaru průřezu chladiče prováděny tak, aby bylo možné chladič vyrobit technologií protlačování. Posledním požadavkem bylo zachování upevňovacích rozměrů chladiče a dodržení maximální dovolené teploty čipu LED diody udané výrobcem.

Pro správné naladění výpočtu bylo nejprve provedeno měření okamžitého příkonu LED diody a maximální teploty pod čipem. Bylo rozhodnuto, že měření teploty chladiče pod čipem LED diody bude probíhat při čtyřech různých ambientních teplotách. Měření začalo na ambientní teplotě 35 °C a končilo na teplotě 80 °C s krokem 15 °C. Po ustálení teploty byla vždy zaznamenána teplota chladiče pod čipem a elektrický proud procházející čipem pro výpočet okamžitého příkonu. Po naměření všech potřebných hodnot byl vzorek vyjmut z temperační pece a bylo ověřeno, že nedošlo k nežádoucí změně elektrického napětí na kontaktech čipu oproti počátečnímu stavu. Z naměřených hodnot byly dopočteny okamžité příkony LED diody, které posloužily jako okrajové podmínky pro teplotní simulaci ustáleného stavu.

Dalším krokem práce byly teplotní simulace ustáleného stavu v softwarech NX 9.0 a Ansys CFX. Byly provedeny čtyři teplotní simulace ustáleného stavu s okrajovými podmínkami, které odpovídaly reálným podmínkám při měření. Rozdíly mezi vypočtenými maximálními teplotami a naměřenými hodnotami se pohybovaly v rozmezí 0,4 až 2,8 °C, což je přípustné. Následně byla provedena verifikační analýza, při které došlo ke zkrácení žeber na počítačovém modelu chladiče. Cílem této analýzy bylo

posoudit, zda se výpočetní model v softwaru Ansys CFX shoduje s výpočetním modelem v softwaru NX 9.0. Výsledné rozdíly v maximální teplotě oproti původnímu tvaru chladiče byly 13,3 °C a 13,8 °C. Výpočetní modely v obou softwarech se tedy při změně chladičích plochy a objemu chladiče shodovaly.

Následně byl analyzován vliv orientace chladiče na maximální teplotu čipu LED diody. Bylo vypočteno 7 simulací ustáleného stavu při různých hodnotách natočení chladiče vzhledem ke gravitaci. Při ambientní teplotě 80°C a vertikální orientaci chladiče byl nárůst teploty, způsobený disipativním výkonem LED diody, roven 31,5°C. Při horizontální orientaci chladiče (žebra směřovala dolů) vzrostla teplota o další 4°C. Rozdíl oproti vertikální orientaci chladiče byl tedy 12,7%. Orientaci chladiče v gravitačním poli při návrhu pasivního chlazení tedy rozhodně není možné zanedbávat a je vhodné orientovat žebra chladiče vertikálně.

Dalším krokem byla optimalizace tvaru chladiče. Při optimalizaci chladiče bylo využito parametrické kótování a parametrická optimalizace v softwaru Ansys Workbench. Nejprve byla provedena úprava tvaru základny žebíř pod čipem LED diody. V dalším kroku byly navrženy tři nové tvary chladiče označené jako A, B a C tvar. Při optimalizaci bylo zapotřebí brát v úvahu požadavky společnosti Varroc Lighting systems. Maximální teplota pod čipem LED diody neměla překročit 125 °C a polotovár pro výrobu chladiče musí být vyrobitelný metodou protlačování. Ambientní teplota při optimalizaci chladiče byla 80 °C, jelikož obdobné teploty dosahuje vzduch ve světlometu při provozních podmínkách. Po optimalizaci navržených tvarů je možné za nejvýhodnější považovat tvar chladiče C. Byla dosažena úspora materiálu 39,7 % a maximální teplota čipu LED diody byla pouze 121,7 °C. Tento tvar chladiče tedy navíc poskytuje i jakousi „rezervu“ s ohledem na možnou úpravu výkonu LED diody.

Cíl diplomové práce byl tedy splněn, tvar chladiče byl optimalizován a představen vedení společnosti Varroc Lighting Systems. V současné době je snaha nově navržený tvar optimalizovat tak, aby bylo možné chladiče vyrobit z „teplovodivého“ plastu. Toto řešení by vedlo k dalšímu výraznému snížení výrobních nákladů.

Seznam použité literatury a převzatých obrázků

Odborné knihy a publikace:

1. KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin Fluent, CFX*. VŠB-TU Ostrava. první. Ostrava, 2008. 153 s.
2. BLEJCHAŘ, Tomáš. *Návody do cvičení „Modelování proudění“ - CFX*. VŠB-TU Ostrava. první. Ostrava, 2009. 133s.
3. ANDRYS, Michal. *Optimalizace výfukového potrubí přeplňovaného zážehového motoru*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Brno, 2010. 67s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída
4. MIŇO, Pavel. *Simulace chlazení kostry elektromotoru*. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní. Ostrava, 2013. 69s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.
5. BLEJCHAŘ, Tomáš. *Turbulence modelování proudění - CFX*. VŠB-TU Ostrava. první. Ostrava, 2009. 259s.
6. JANALÍK, Jaroslav, ŠTÁVA, Pavel. *Mechanika tekutin*. VŠB-TU Ostrava. první. Ostrava, 2002. 126s.
7. KOZUBKOVÁ, Milada, BLEJCHAŘ, Tomáš, BOJKO, Marian. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. VŠB-TU Ostrava. první. Ostrava, 2011. 173s.
8. VARROC LIGHTING SYSTEMS, *Heatsink design consideration and drawbacks*. Interní dokument. Nový Jičín, 2008. 21s.

Elektronické zdroje:

9. *Tips & Tricks: Turbulence Part 1 – Introduction to Turbulence modeling* [online], LeapAustralia Computational fluid dynamics blog. © 2014 [cit 2015-05-5]
Dostupné z: <http://www.computationalfluidynamics.com.au/>
10. *Tips & Tricks: Inflation Layer Meshing in Ansys* [online], LeapAustralia Computational fluid dynamics blog. © 2014 [cit 2015-05-5]
Dostupné z: <http://www.computationalfluidynamics.com.au/>

11. *Tips & Tricks: Turbulence Part 4 – Reviewing how well you have resolved the Boundary layer* [online], LeapAustralia Computational fluid dynamics blog. © 2014 [cit 2015-05-5] Dostupné z: <http://www.computationalfluiddynamics.com.au/>
12. *Tips & Tricks: Inflation Layer Meshing in Ansys* [online] LeapAustralia Computational fluid dynamics blog. © 2014 [cit 2015-05-5] Dostupné z: <http://www.computationalfluiddynamics.com.au/>
13. *Tips & Tricks: Convergence and Mesh Independence Study* [online] LeapAustralia Computational fluid dynamics blog. © 2014 [cit 2015-05-5] Dostupné z: <http://www.computationalfluiddynamics.com.au/>
14. *Heat transfer coefficient* [online] © 2015 [cit 2015-05-5] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer_coefficient
15. *Rayleigh number* [online] © 2015 [cit 2015-05-5] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_number
16. *CFD Online forum - ANSA* [online] © 2015 [cit 2015-05-5] Dostupné z: <http://www.cfd-online.com/Forums/ansa/>

Převzaté obrázky a tabulky:

- [1] *Produkty Varroc Lighting Systems* [online], [cit 2015-05-5] Dostupné z: www.varroc.cz
- [2] *Lokality globálního působení Varroc Group* [online], [cit 2015-05-5] Dostupné z: www.varroc.cz
- [3] *Aluminium Extrusion Catalogue* [online], [cit 2015-05-5] Dostupné z: <http://imgbuddy.com/aluminium-extrusion-catalogue.asp>
- [4] *Folded fins* [online], [cit 2015-05-5] Dostupné z: <http://thermocoolcorp.com/project/folded-fins/>
- [5] *LED cooling technology* [online], [cit 2015-05-5] Dostupné z: <http://machinedesign.com/energy/>
- [6] *Xicato star LED cooler* [online], [cit 2015-05-5] Dostupné z: <http://.led-heatsink.com/>
- [7] *Heat transfer* [online], [cit 2015-05-5] Dostupné z: <http://www.online-sciences.com/the-energy/the-ways-of-heat-transfer-through-different-media/>

- [8] *Natural convection, heatsink, fluid* [online], [cit 2015-05-5]
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Natural-convection-heat-sink-fluid-WBG.jpg>
- [9] *Finite element shapes* [online], [cit 2015-05-5]
Dostupné z: <http://illustrations.marin.ntnu.no/structures/analysis/FEM/theory/>
- [10] *Design for Extrusion Consideration, Tolerances and Review* [online], [cit 2015-05-5]
Dostupné z: <http://www.engineersedge.com/extrusion.htm>